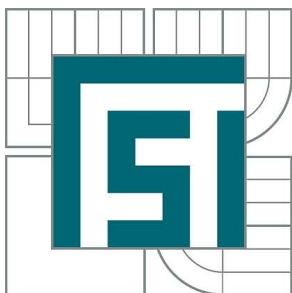


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
LETECKÝ ÚSTAV

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF AEROSPACE ENGINEERING

PRODLOUŽENÍ ŽIVOTNOSTI LETOUNŮ ZLIN Z 126 A 226

SAFE-LIFE EXTENSION PROGRAM FOR ZLIN Z 126 AND 226 AIRPLANES

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Bc. MILAN JANČÁŘ

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. PETR AUGUSTIN, Ph.D.

BRNO 2012

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Letecký ústav

Akademický rok: 2011/2012

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

student(ka): Bc. Milan Jančář

který/která studuje v **magisterském navazujícím studijním programu**

obor: **Stavba letadel (2301T039)**

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

Prodloužení životnosti letounů ZLIN Z 126 a 226

v anglickém jazyce:

Safe-life extension program for ZLIN Z 126 and 226 airplanes

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Zpracování podkladů pro prodloužení životnosti letounů ZLIN Z 126 a 226 zahrnující výměnu pásnic a závěsných kování hlavního nosníku křídla. Návrh technologického postupu přestavby křídla.

Cíle diplomové práce:

Cílem diplomové práce je zpracování programu prodloužení bezpečné únavové životnosti letounů Z 126 a 226 založeného v souladu se závěry studie [1] na provedení výměny pásnic a závěsných kování hlavního nosníku křídla. Návrh programu prodloužení životnosti bude zahrnovat:

- statický výpočet křídla a centroplánu pro posouzení stávajícího výběru únavově kritických míst,
- přepočet bezpečné životnosti křídla a centroplánu,
- výběr materiálu pro výrobu nových pásnic hlavního nosníku křídla a posouzení jeho únavových vlastností,
- návrh technologického postupu přestavby křídla a
- zpracování příslušné výkresové dokumentace.

Seznam odborné literatury:

- [1] Augustin, P.: Studie možností prodloužení životnosti letounu ZLIN Z 226 M a Z 226 MS. Zpráva LU56-2009-OST.ST, Letecký ústav FSI VUT v Brně, 2009.
- [2] Kahánek, V., Malěř, Z., Švarc, A.: Zpráva o určení životnosti letounu Z 226 M po přestavbě z letounu Z 226 B a Z 226 T. Zpráva T-002/81, Aerotechnik Uherské Hradiště – Kunovice, 1980.
- [3] Jančář, M.: Zhodnocení systému prohlídek a oprav draků pro letouny ZLIN řady 26. Bakalářská práce, FSI VUT v Brně, 2010.
- [4] Popis-obsluha-údržba ZLIN 226 MS, Aerotechnik Kunovice, 1992
- [5] Závazný bulletin Z 126, Z 226/34a-Rev. 1
- [6] Opravárenská příručka Z 126, Z 226, Moravan a.s. Otrokovice, 1994
- [7] Protokoly o provedení prohlídky letounu Technickou komisí Moravan, sbírka protokolů vybraných letounů Z 226.

Vedoucí diplomové práce: Ing. Petr Augustin, Ph.D.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2011/2012.

V Brně, dne 26.11.2011

L.S.

prof. Ing. Antonín Pištěk, CSc.
Ředitel ústavu

prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc.
Děkan fakulty

ABSTRAKT

Diplomová práce pojednává o možnostech prodloužení životnosti letounů ZLIN Z 126 a 226, které jsou i přes své stáří a dávno ukončenou výrobu stále oblíbené a rozšířené nejen v České republice. Se stářím těchto strojů souvisí také fakt, že některé letouny se již nezadržitelně blíží své hranici životnosti a sílí tak zájem po jejich co nejdelší době letuschopnosti, jak po technické, tak legislativní stránce. Jak již bylo zmíněno v mé bakalářské práci, v průběhu existence této modelové řady nebyla zjištěna žádná zásadní provozní poškození s výjimkou sporadické vrstevnaté koroze pásnic křídla. Praxe s údržbou těchto letounů tak poukazuje na jisté podhodnocení současného limitu až 5500 letových hodin a je tedy nasnadě navrhnout možný postup pro zvýšení současného limitu. V diplomové práci je tedy v této souvislosti uvažována možnost výroby nových pásnic křídel z jiného materiálu, provedený únavový výpočet pro křídlo s vyměněnými pásnicemi a navržen technologický postup této výměny tak, aby letouny ZLIN Z 126 a 226 mohly být bezpečně provozovány i nadále.

Klíčová slova: letoun, ZLIN, křídla, nosník, pásnice, napětí, životnost, únava, spektrum, zatížení, profil, akrobacie, normal, materiál, výměna, demontáž, postup.

ABSTRACT

This master's thesis discusses the possibilities of safe-life extension program for ZLIN Z 126 and 226 airplanes, which despite their age and long-end production are still widespread and popular not only in the Czech Republic. The age of these aircraft is also related to the fact, that some aircraft are already approaching its border life, so there is an interest for the longest possible technical and legislative airworthiness. As mentioned in my bachelor's thesis, during the existence of this model series, there was no major damage occurred, except for sporadic exfoliation corrosion of wing flanges. Experience with maintenance of this aircraft points to certain underestimation of the current 5500hrs lifetime and it is obvious to suggest possible steps to increase the current limit. The thesis is therefore considered in this context the possibility of producing new wing flanges made of another material, performed the calculation for wing fatigue exchanged with flanges and designed technological process of this exchange, so that ZLIN Z 126 and 226 airplanes can be safely operated in the future.

Key words: airplane, ZLIN, wings, spar, flange, stress, safe-life, fatigue, spread, load, profile, aerobatics, normal, material, exchange, dismantling, procedure.

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE VLASTNÍ PRÁCE

JANČÁŘ, M. *Prodloužení životnosti letounů ZLIN Z 126 a 226*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2012. 54 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Petr Augustin, Ph.D.

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma *Prodloužení životnosti letounů ZLIN Z 126 a 226* vypracoval samostatně, pod dohledem vedoucího bakalářské práce Ing. Petra Augustina, Ph.D., vycházel jsem ze svých znalostí, odborných konzultací, z použitých pramenů a literatury uvedené v závěru mé práce.

V Brně dne 25. května 2012

.....

PODĚKOVÁNÍ

Na tomto místě bych rád poděkoval vedoucímu mé bakalářské práce Ing. Petru Augustinovi, Ph. D. za poskytnuté materiály, konzultace a čas, který věnoval mé práci. Mé poděkování rovněž patří společnostem ZLÍN – AVION SERVICE, s. r. o. a ZLIN AIRCRAFT a.s. za další poskytnuté podklady a konzultace, bez kterých by tuto práci nebylo možné napsat.

OBSAH

1. Úvod	9
2. Statický výpočet křídla a centroplánu pro posouzení stávajícího výběru únavově kritických míst	11
3. Určení životnosti	15
3.1 Spektra zatížení a skladba provozu	15
3.2 Únavové křivky	18
3.3 Únavový výpočet	20
3.4 Výsledky únavového výpočtu	24
3.5 Závěry plynoucí z únavových výpočtů	34
4. Výběr materiálu a posouzení jeho únavových vlastností	35
4.1 Výběr materiálu	35
4.2 Srovnání materiálů	35
4.3 Posouzení únavových vlastností	36
5. Návrh technologického postupu přestavby křídla	37
5.1 Výměna pásnic	38
5.2 Další možné důvody k výměně pásnic a jejich postupy	46
5.2.1 Výměna pásnic v důsledku koroze nebo jiného poškození	46
5.2.2 Výměna pásnic za účelem prodloužení provozní životnosti křídel	46
6. Závěr	51
7. Literatura	52
8. Zkratky a označení	53

1. ÚVOD

V současné době je v provozu po celém světě (převážně však v Evropě) několik set letounů ZLIN Z 26 - Series (TC EASA.A.353). Většina těchto letounů za svůj život již prodělala několik generálních oprav nebo oprav po nehodách a počet letounů, které jsou dodnes v provozu jen dokazuje oblíbenost tohoto typu, navzdory jeho stáří. Vždyť první prototyp Z 26 vzletl již v roce 1947 a poslední letouny Z 726 opustily továrnu n. p. Moravan v Otrokovicích v roce 1977. Celkově bylo vyrobeno téměř 1500 kusů této typové řady.



Obr. 1 - ZLINy Z 226 MS

Pro provozovatele, organizace údržby a společnosti zabývající se udržováním letové způsobilosti těchto strojů ale není datum ukončení produkce jen historickým milníkem, nýbrž s časem narůstajícím problémem týkajícího se praktické nedostupnosti značného počtu náhradních dílů nikoliv z oblasti agregátů letounu jako spíše letadlových celků primární konstrukce draku.

V praxi dochází k poškození letounů, které z technického hlediska není pro letoun fatální a existují organizace údržby, které jsou schopny opravit i de facto odepsaný stroj. Jako největším problémem se jeví oprava křídel, ať už jsou poškozena následkem nehody anebo korozí. Většina komponentů křídla je stále ještě dostupná.

V případě poškození hlavního nosníku křídla ale bývá letoun většinou již vyřazen z provozu a to hlavně z následujících důvodů:

- a) nová křídla jsou již delší dobu nedostupná
- b) komponenty konstrukce hlavního nosníku křídla jsou u některých organizací údržby skladem pouze v jednotlivých kusech
- c) kritickým dílem, co se dostupnosti týká, jsou pak úhelníky - pásnice hlavního nosníku
- d) žádná organizace údržby není oprávněna vyrábět letadlové celky a žádný letecký výrobce nemá zájem vyrábět jednotlivé kusy či malé série dílů letadel, která jsou v provozu již více než 40 let

Příklad, kdy dojde k poškození systému hlavního nosníku křídla nebyl však vybrán náhodně. Jak vyplývá z podkladů [7], je u Z 26 - Series právě křídlo letadlovým celkem, který určuje životnost celého draku letounu (křídlo je kritickým komponentem). Pro opravy křídel je tedy zcela zásadní zajistit dostupnost úhelníku pásnice hlavního nosníku.



Obr. 2 - SP-KSM po nouzovém přistání na silniční komunikaci

V případě, že se provozovatel letounu rozhodne pro jeho uvedení do provozu po nehodě, je tak do budoucna v zájmu organizace údržby držení oprávnění pro výměnu z hlediska životnosti tak podstatného dílce jako je pásnice hlavního nosníku křídla.

Samotný postup provedení výměny pásnic křídel (popsáno v kapitole 5) se nejeví být velkou překážkou. Nicméně s ohledem na fakt, že původní materiál pásnic křídel Z 26 Series byl tvořen profilovou tyčí ČSN Z424222.71, vyplývají hned z počátku tři problémy:

- a) je třeba najít vhodný ekvivalent výše uvedeného materiálu, který se již léta nevyrábí. Zejména v důsledku jeho horších únavových charakteristik a náchylnosti k vrstevnaté korozi.
- b) zajistit výrobu pásnic hlavního nosníku, neboť některé z nich nemají pouze úhel 90° základního polotovaru, nýbrž jsou tvarovány (viz. např. úhelníky horní, přední) na úhel různý od 90°.
- c) třetím problémem se jeví legalizace - schválení použití náhradního materiálu pro tak zásadní letadlový celek, jakým je hlavní nosník křídla. Z toho vyplývá nutnost spolupráce s DOA, následně pak s největší pravděpodobností bude nutná pevnostní a únavová zkouška.

S ohledem na výše uvedené bude nezbytné respektovat veškerá doporučení a předpisy ÚCL a EASA.

V souvislosti s výměnou pásnic se také nabízí myšlenka znovuuvedení do provozu letounu, který byl již "dolétán" dle současně stanovené životnosti 5500 LH [2, 5], která se odvíjí právě od křídel letounu. Z více než šedesátileté praxe údržby letounů ZLIN řady 26 je totiž patrné, že kromě velmi sporadické vrstevnaté koroze (problematika popsána v [3]) na pásnicích některých křídel, k žádným jiným poškozením nedochází.

2. STATICKÝ VÝPOČET KŘÍDLA A CENTROPLÁNU PRO POSOUZENÍ STÁVAJÍCÍHO VÝBĚRU ÚNAVOVĚ KRITICKÝCH MÍST

Únavový výpočet je proveden pro dvě kritická místa konstrukce určená dle [2]. Jedná se o dolní duralovou pásnici hlavního nosníku křídla v řezu 150mm od žebra č. 2 (řez 2S na obr. 3). Toto místo je vybráno z důvodu umístění kování, v jehož poslední řadě svorníků u obdobných spojů obvykle dochází k poruchám. Napětí byla získána z tenzometrických měření dvou tenzometrů (T5 a T6) podle [8]. Umístění tenzometrů se mírně liší od výběru kritického místa a proto bylo nutné získaná napětí extrapolovat tak, aby co nejlépe odpovídala pro řez 2S. Extrapolace byla provedena pomocí vztahu

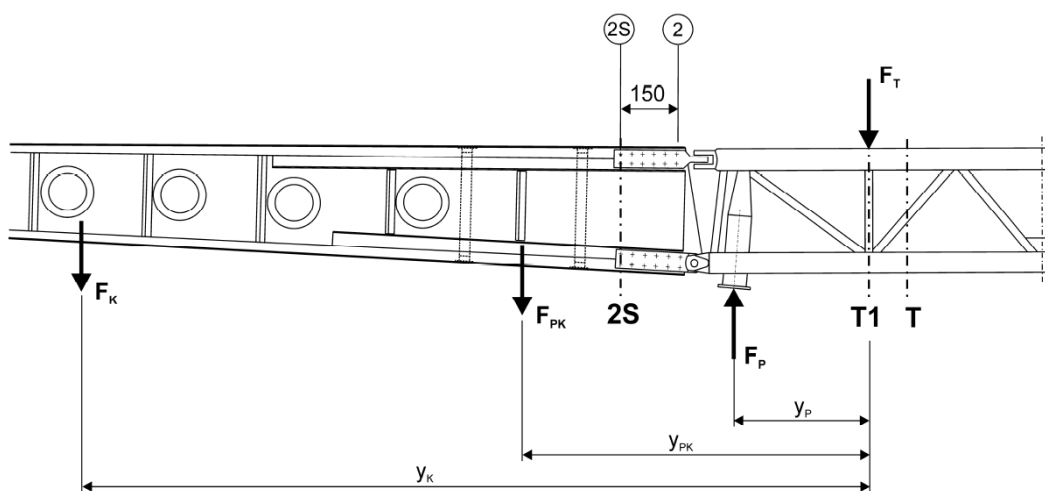
$$\sigma_{1g}^{LET} = (\sigma_{1g}^{LET})^T \cdot \frac{z_{VV}}{z_T}$$

kde $(\sigma_{1g}^{LET})^T$ je napětí na tenzometru pro $n=1$ vyhodnocené z měření a z_T a z_{VV} vzdálenosti tenzometru.

Tenzometr	z_T (mm)	$(\sigma_{1g}^{LET})^T$ (MPa)	z_{VV} (mm)	σ_{1g}^{LET} (MPa)	σ_{1g}^{LET} (MPa) průměr
T5	97	20.51	157.8	33.37	33.84
T6	100	21.74	157.8	34.31	

Tab. 1 - napětí v dol. pásnici křídla při $n=1$ (let. měř., $m=826\text{kg}$)

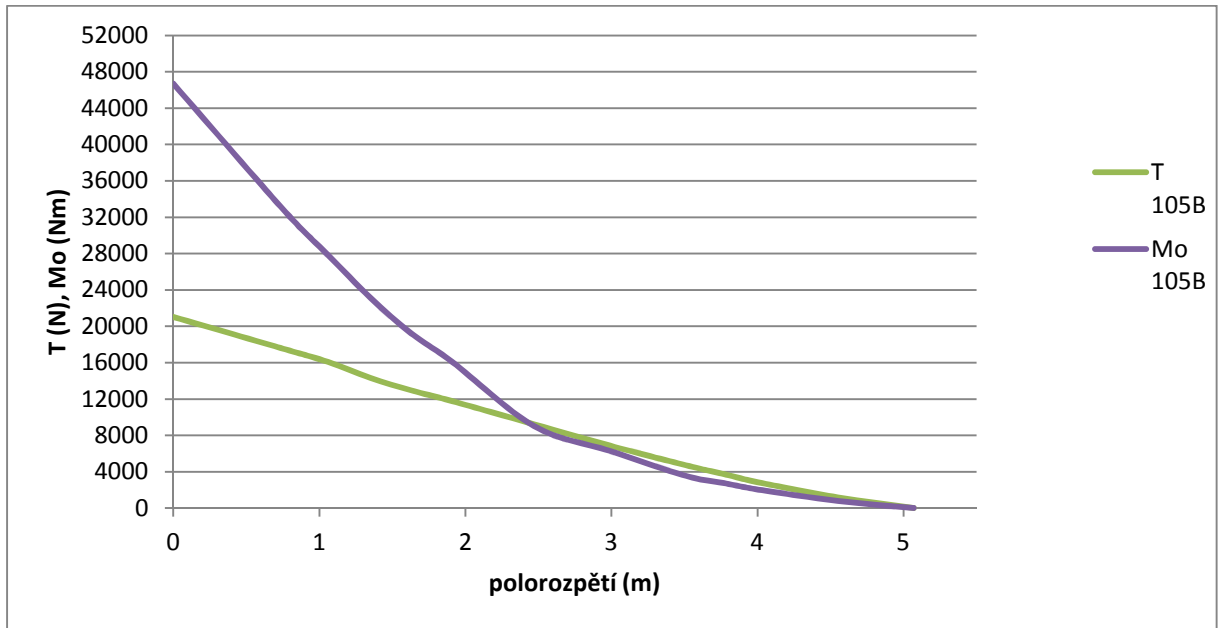
Druhé kritické místo se nachází v oblasti příhradové konstrukce centroplánu, rovněž na dolní pásnici a sice mezi vetknutím nosníku do samotného trupu a rovinou symetrie letounu, kde byl umístěn tenzometr, viz. řez T na obr. 3.



Obr. 3 - kritická místa 2S a T

Pro únavový výpočet jsou napětí, která byla zjištěna při tenzometrických měřeních brána jako rozhodující. Pro úplnost jsou však naměřená letová napětí v dolní pásnici pro násobek $n = 1$ také porovnána s napětími spočtenými. Pro tento výpočet bylo využito rozložení ohybového momentu po rozpětí křídla, které bylo stanoveno pomocí programu Glauert a dále bylo také aplikováno rozložení ohybového momentu (případ 105B), které bylo získáno z archivu ZLIN AIRCRAFT a.s.

Případ zatížení 105B platí pro násobek $n = 6$, hmotnost letounu $m = 765\text{kg}$ a rychlost $v = 313\text{km/h}$. Průběh zatížení je zobrazen v grafu 1. K určení zatížení s využitím dat z Glauertu pak bylo potřeba doplnit mj. hmotnost křídla $m_{kř} = 60\text{kg}$, plochu křídla $S_{kř} = 14,855\text{m}^2$, rozpětí $y = 10,14\text{m}$, koeficient vztlaču křídla $c_{Lkř} = 1,47$ a střední aerodynamickou těživu $c_{sat} = 1,5325\text{m}$.



Graf 1 - průběh ohybového momentu a posouvací síly případu zatížení 105B

CENTROPLÁN	1A 730kg	2A 820kg	1N 810kg	2N 890kg	765kg	σ_{1g}^{LET}
Glauert / Excel	40.65	46.81	46.12	51.59	43.05	MPa
Tenzometrické měření	50.95	57.23	56.53	62.12		MPa
Případ 105B	58.38	59.96	59.23	65.08	55.94	MPa
KŘÍDLO	1A 730kg	2A 820kg	1N 810kg	2N 890kg	765kg	σ_{1g}^{LET}
Glauert / Excel	20.23	23.30	22.96	25.69	23.51	MPa
Tenzometrické měření	29.90	33.59	33.18	36.46		MPa
Případ 105B	26.87	30.19	29.82	32.76	28.16	MPa

Tab. 2 - letová napětí v kritických místech pro n=1

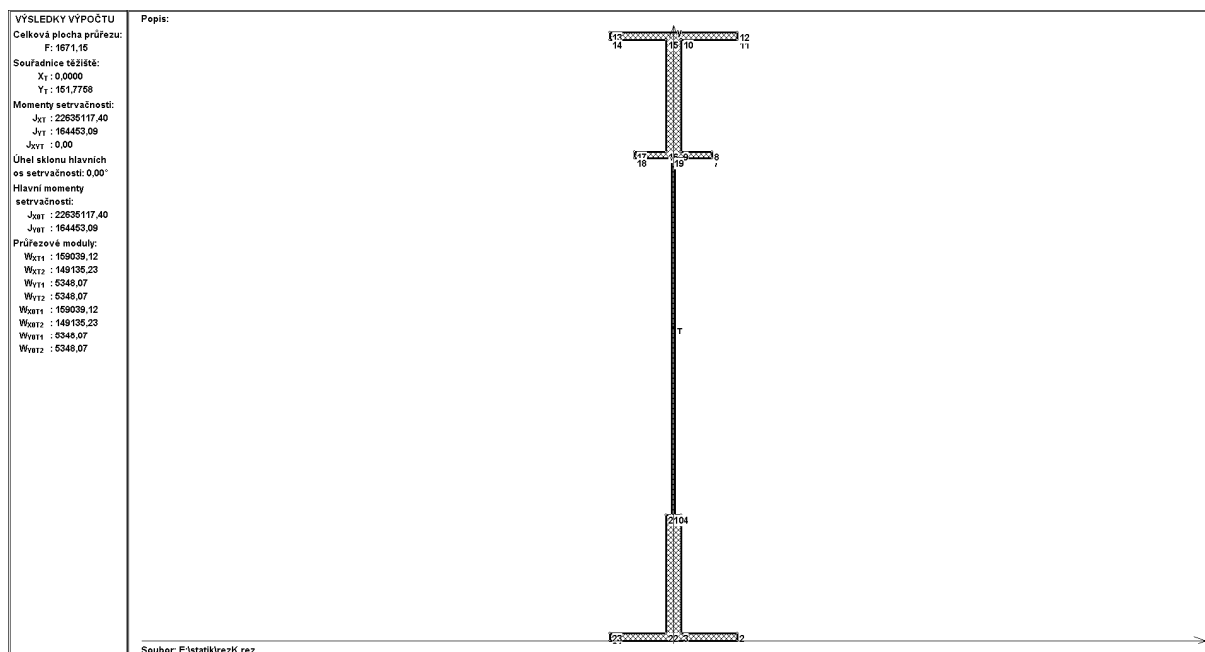
Výsledky jsou shrnuty v tabulce 2. Jednotlivé sloupce odpovídají hmotnostním kategoriím pro sólo či dvojí obsazení a provozu v třídě Akrobatické nebo Normální. Přepočet napětí na požadovanou letovou hmotnost byl proveden dle rovnice:

$$(\sigma_{1g}^{LET})^{m_2} = (\sigma_{1g}^{LET})^{m_1} \cdot \frac{m_2}{m_1}$$

Z pohledu napětí stanovených pro centropoplán je patrné, že hodnoty určené díky programu Glauert jsou sice nižší, ale vzhledem k jednoduchosti vstupu programu je nutné brát je s rezervou. Pro co nejpřesnější výsledek únavového výpočtu centropoplánu tak budou použita napětí získána z tenzometrických měření, stejně jako u křídla, kde jsou tyto výsledky považovány za nejpřesnější možné.

Pro posouzení stávajícího výběru kritických míst byly v systému hlavního nosníku křídla rovněž vyhodnoceny další dva řezy. Výpočet napětí pomocí dat z programu MiniStatik v těchto řezech však podle předpokladu neprokázal napětí vyšší než jaké se vyskytuje v kritickém místě výše.

První řez (viz obr. 4) se nachází ve vzdálenosti 586mm od druhého žebra. Ohybový moment pro tuto vzdálenost je dle případu zatížení 105B 23143700mm⁴. Program MiniStatik určil průřezový modul dolní pásnice $W_{XT} = 149135,23\text{mm}^3$, tomu pak odpovídají napětí v tabulce 3.



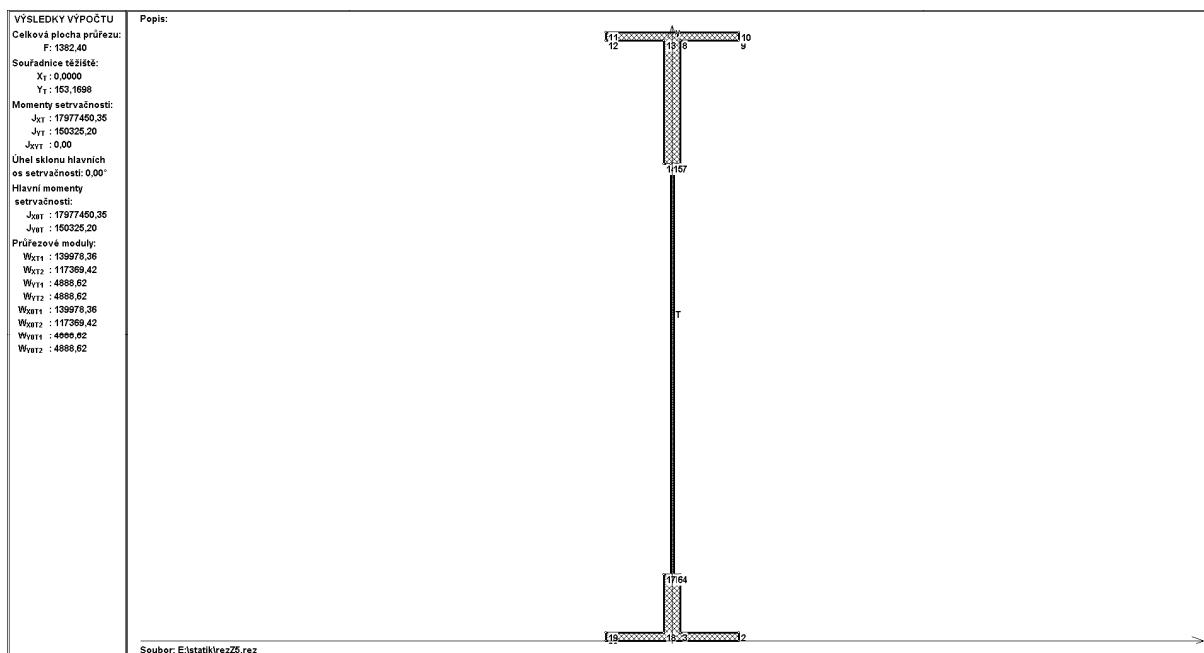
Obr. 4 - řez systému hlavního nosníku křídla pro 586mm

Druhý řez (viz. obr. 5) leží v rovině pátého žebra, tedy 870mm od druhého žebra v systému křídla. Ohybový moment pro tento řez je dle 105B 19221000mm⁴. Dle MiniStatiku je průřezový modul $W_{XT} = 117369,42\text{mm}^3$, a odpovídající napětí jsou v tabulce 3.

KŘÍDLO	1A 730kg	2A 820kg	1N 810kg	2N 890kg	σ_{1g}^{LET}
řez 586mm	24.68	27.72	27.38	30.09	MPa
řez 870mm	26.04	29.25	28.89	31.75	MPa

Tab. 3 - letová napětí ve zvolených řezech pro n=1

Při pohledu do tabulky je tedy zřejmé, že ani jedno napětí v dané hmotnostní a letové kategorii nepřekračuje napětí z tenzometrického měření. Kritické místo na dolní pásnici nosníku křídla z obr. 3 je tedy zvoleno správně a není třeba v únavovém výpočtu počítat s jinými napětími než z tenzometrických měření.



Obr. 5 - řez systému hlavního nosníku křídla pro 870mm

Závěrem je nutné také zmínit napětí z tenzometrických měření odpovídající stání letounu na zemi. Tato napětí jsou použita v únavových výpočtech poškození pro přistávací ráz, odskok, pojezd a cyklus Z-V-Z (země-vzduch-země) a byla převzata ze zprávy [1].

	1A 730kg	2A 820kg	1N 810kg	2N 890kg	σ_{1g}^{ZEM}
KŘÍDLO	-5,4	-5,4	-5,4	-5,4	MPa
CENTROPLÁN	-4,3	-3,25	-4,3	-3,25	MPa

Tab. 4 - napětí v kritických místech pro letoun na zemi

3. URČENÍ ŽIVOTNOSTI

Životnost letounu, resp. jeho dvou stěžejních částí a sice křídla a nosníku centroplánu je stanovena výpočtem jehož metodika vychází ze zprávy [1] a je doplněna o únavovou křivku materiálu 7075-T6 (popsán v kap. 4), určeného pro výrobu nových pásnic křídla.

3.1 Spektra zatížení a skladba provozu

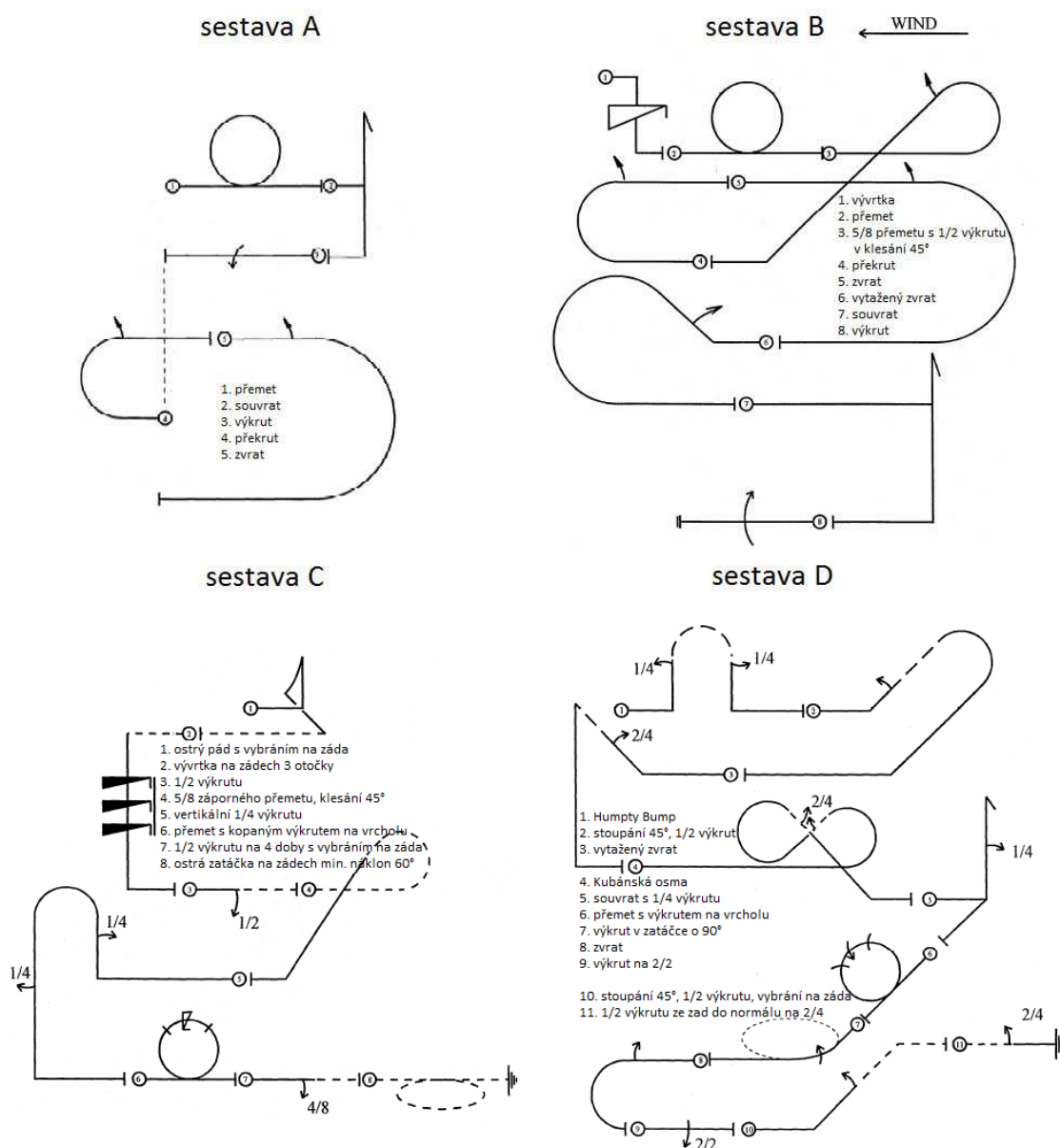
Spektra zatížení jsou nezbytným elementem pro výpočet životnosti kteréhokoliv letounu, díky informaci s jakými násobky a jak často se letoun potýká během své typické mise.

Pro výpočet životnosti letounů ZLIN řady 26 byla volena letová spektra jak akrobatická, tak spektra zastupující provozní kategorii Normal. Tato spektra mají při výpočtech majoritní vliv na životnost, do výpočtů je však zahrnut i vliv přistávacího rázu, následného odskoku, pojiždění a také cyklus Z-V-Z.

Spektrum **Kahánek Akrobacie** je převzato ze zprávy [2], která stanovuje současný limit životnosti.

Spektrum **ZLIN-A** vychází z měření dvouparametrickým registračním akcelerometrem AMU na letounu Z-242 L a skládá se z následujících akrobatických sestav, kde sestava A platí pro rekreační akrobacii, sestava B reprezentuje základní výcvik pilotů, kdežto sestava C pokročilý výcvik pilotů. Sestava D pak značí soutěžní provoz.

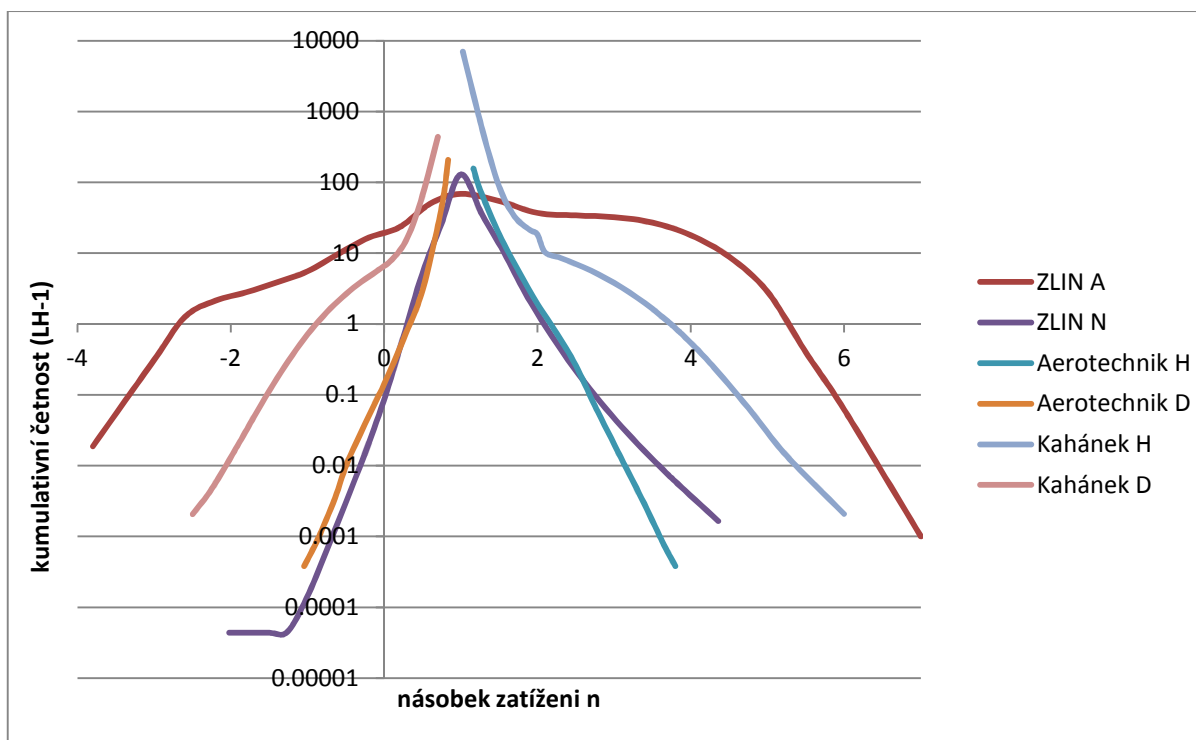
Na požadavek ÚCL byly sestavy odlétány celkem šesti různě zkušenými piloty, kde každý pilot mohl danou sestavu odlétat maximálně třikrát. Jednotlivé sestavy jsou zobrazeny v obr. 6 pomocí Arestiho symbolů níže.



Obr. 6 - Arestiho symboly pro jednotlivé sestavy

Spektrum **ZLIN-N** bylo naměřeno na letounech Z 142 a Z 143 během tří typů letů; přelet, výcvik a okruh.

Spektrum **Aerotechnik** vychází z měření na vlečných letounech ZLIN řady 26 z let 1985 až 1990 pod vedením podniku Aerotechnik a skládá se převážně z vlečných letů na letounech Z 326 M a Z 226 MS.



Graf 2 - spektra zatížení

S volbou spekter také souvisí doba, po kterou letoun pobýval ve vzduchu při provozu v dané kategorii a profilu letu. Následující hodnoty vychází z letových záznamů sumarizovaných v [1].

U akrobatických spekter Kahánek a ZLIN-A, kde spektrum ZLIN-A je tzv. "ostřejší" platí délka průměrného akrobatického provozu 17minut na jeden let, s tím, že spektrum ZLIN-A uvažujeme v sólo obsazení, kdežto mírnější spektrum Kahánek je použito do výpočtů pro obsazení dvojí. Toto vychází z letové příručky letounu Z 226 T, kde je stanoveno, že všechny akrobatické prvky lze vykonávat pouze v sólo obsazení, kdežto v obsazení dvojím lze provádět tzv. základní bojové obraty, a to: bojovou zatáčku, souvrat, výkrut, překrut, přemet, zvrát, a krátkodobý let na zádech.

Pro spektrum ZLIN-N, které je aplikováno v rámci profilů letu; přelet, výcvik a okruh platí hodnoty 60, 30 a 6 minut letu.

U spektra Aerotechnik uvažovaného pro vlekání byla délka vlečného letu stanovena na 12 a půl minuty.

Dalším důležitým parametrem je podíl procentuálního zastoupení jednotlivých profilů letu v celkovém provozu letounu pro dvojí a sólo obsazení, kde akrobatický provoz a vlektání mají na životnost majoritní vliv.

Profil letu	Akrobacie	Přelet	Výcvik	Okruh	Aerovlek
Zastoupení sólo, k_s	0.65	0.5	0.5	0.5	0.5
Zastoupení dvojí, k_D	0.35	0.5	0.5	0.5	0.5
Zast. kat. A, k_p	0.4	0.15	0.15	0.15	0.15
Zast. kat. N, k_p	0	0	0	0	1

Tab. 5 - zastoupení profilů letu

3.2 Únavové křivky

Pro výpočty životnosti bylo použito celkem pět únavových křivek. Pro centropoplán je to křivka **Z 226 T** (pro trhlinu o délce 30mm), která byla stanovena na základě zkoušek nosníků centropoplánu popsanych v [10]. Vliv středního napětí je u této křivky zahrnut Odingovou korekcí:

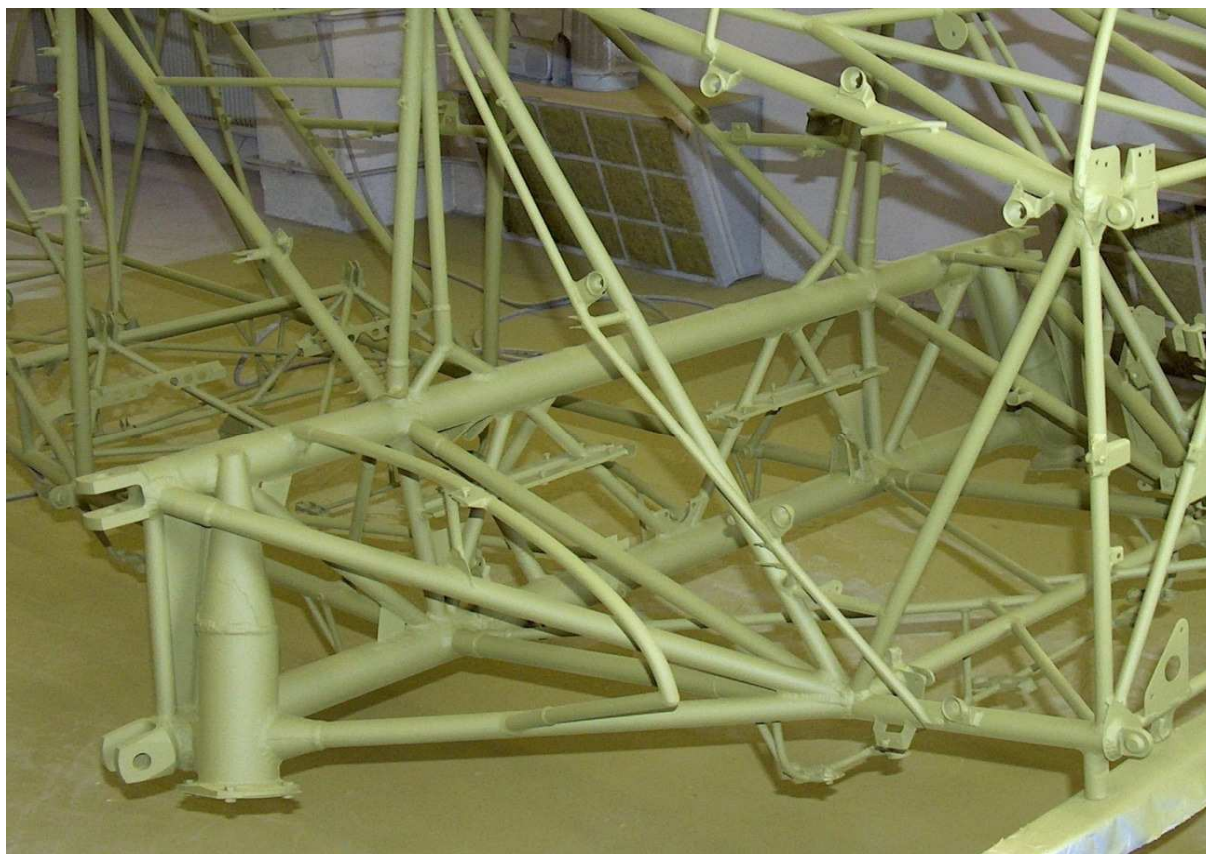
$$\sigma_{hekv} = \sqrt{2 \cdot \sigma_a \cdot (\sigma_a + \sigma_m)}$$

pro $\sigma_m < 0$ pak

$$\sigma_{hekv} = \sqrt{2 \cdot \sigma'_a \cdot (\sigma'_a + |\sigma_m|)}$$

kde

$$\sigma'_a = \sigma_a - |0,35 \cdot \sigma_m|$$



Obr. 7 - detail nosníku centropoplánu Z 226 tzv. "v plniči" před konečným lakováním

Pro křídlo jsou to pak křivky následující:

Křivka **L-200 V95** vychází ze zkoušek křídla stejnojmenného českého letounu, jehož konstrukce, technologie výroby, použitý materiál a spojení s centroplánem je nejbližší křídlu letounů ZLIN řady 26, u kterých zkouška křídla nebyla provedena. Pro zahrnutí vlivu středního napětí je u této křivky rovněž použito Odingovi korekce (viz. výše).

Křivka **7075-T6** je převzata z databáze materiálových charakteristik [11] a vychází ze zkoušek eloxovaných vzorků z duralové slitiny 7075-T6 o vrubovitosti $K_t = 5$.

Křivka **E.02.01** reprezentuje životnosti křídel a ocasních ploch z Al slitin o maximální vrubovitosti $K_t = 4$, doporučených v metodice FAA. Křivka je vhodná pro konveční nýtované konstrukce.

Poslední únavová křivka se značí **R.A.E** a je odvozena ze zkoušek více než dvou set duralových spojů křídel. Je tudíž doporučována pro vyhodnocování životnost konstrukčních spojů kování s nosníkem, jako je tomu u křídla Z 226. Křivka platná pro $\sigma_m = 90\text{MPa}$ je popsána rovnicí:

$$\sigma_m = 10,3 \cdot \left(1 + \frac{1000}{\sqrt{N + B}} \right)$$

kde

$$B = \left(\frac{1000}{\frac{\sigma_p - \sigma_m}{10,3} - 1} \right)^2$$

kde σ_p je statická pevnost konstrukce, která by se měla volit ne vyšší než 400MPa. Vliv středního napětí je započten pomocí korekce R.A.E. jako

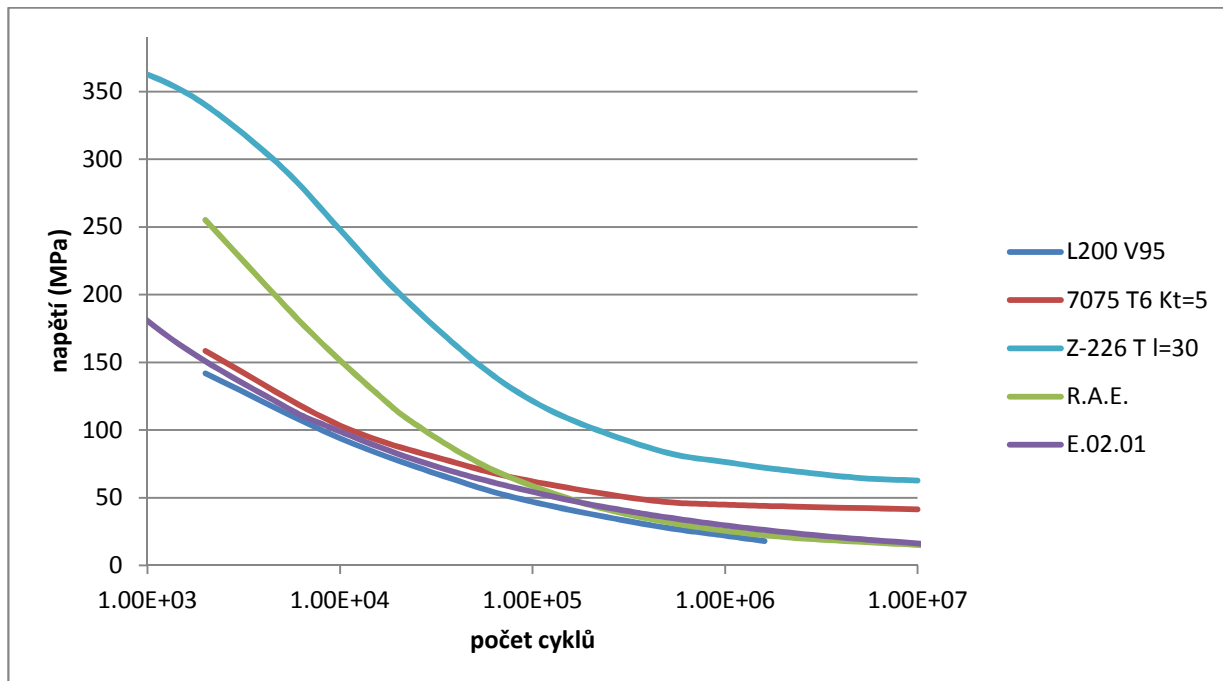
$$N_m = k_m \cdot N$$

kde N je počet cyklů do poruchy při $\sigma_m = 90\text{MPa}$ a N_m je korigovaná hodnota při odlišném středním napětí. Pro $\sigma_m \geq 50\text{MPa}$ pak

$$k_m = \frac{90}{\sigma_m}$$

Při $\sigma_m > 50\text{MPa}$ pak

$$k_m = -0,0416 \cdot \sigma_m + 3,88$$



Graf 3 - S-N křivky

Z grafu 3 je patrné, že ačkoliv byla záměrně zvolena křivka materiálu 7075-T6 s nejvyšší vrubovitostí, výpočet životnosti křídla pravděpodobně přinese více než uspokojivé výsledky v porovnání se současným materiálem a životností určenou dle L 200 V95.

3.3 Únavový výpočet

Výpočet poškození je proveden zvlášť pro spektrum letového zatížení (poryv s manévry) a dále pro přistávací ráz, následný odskok, pojezd a cyklus Z-V-Z, jak již bylo zmíněno výše. Hodnoty napětí pro jednotlivé zatěžovací kmity u **letových zatížení** vycházejí z násobků zatížení v horní a dolní větvi spekter

$$\sigma_h = n_h \cdot \sigma_{1g}^{LET}$$

$$\sigma_d = n_d \cdot \sigma_{1g}^{LET}$$

Z horních a dolních napětí jsou pak odvozeny střední hodnoty a amplitudy, pro které platí

$$\sigma_m = \frac{\sigma_h - \sigma_d}{2}$$

$$\sigma_a = \frac{\sigma_h + \sigma_d}{2}$$

Po určení středního napětí a amplitudy napětí stanovíme napětí efektivní, pokud to výpočet pro danou křivku vyžaduje, například pomocí Odingovy korekce na střední napětí uvedené výše.

U výpočtů poškození od **přistávacího rázu** se uvažuje maximální napětí rovno dvěma třetinám napětí letového při násobku 1. Minimum napětí je naopak dáno součinem daného násobku při dopadu letounu a napětí pro letoun stojící na zemi.

$$\sigma_h = \frac{2}{3} \cdot \sigma_{1g}^{LET}$$

$$\sigma_d = n \cdot \sigma_{1g}^{ZEM}$$

Odskok bývá uvažován jako druhý kmit po přistávacím rázu a výpočet jeho poškození se od přistávacího rázu liší jen velikostí amplitudy napětí, která odpovídá 60% amplitudy napětí od přistávacího rázu.

Při **pojízďení** letounu se předpokládá oscilace napětí kolem hodnoty, kdy letoun stojí klidně na zemi. Proto

$$\sigma_m = \sigma_{1g}^{ZEM}$$

$$\sigma_a = \Delta n \cdot \sigma_{1g}^{ZEM}$$

Kde Δn reprezentuje přírůstek násobku při přejezdu nerovnosti, či brzdění nebo zatáčení.

Maximum cyklu **Z-V-Z** je dáno násobkem spektra letového zatížení, který se v něm vyskytuje jednou za let. Minimum cyklu Z-V-Z je pak obdobně definováno násobkem zatížení, kterému ve spektru pozemního zatížení získaného součtem četností spekter přistávacího rázu a pojezdu odpovídá četnost jedenkrát za let. Pak

$$\sigma_h = n_{hZVZ} \cdot \sigma_{1g}^{LET}$$

$$\sigma_d = n_{dZVZ} \cdot \sigma_{1g}^{ZEM}$$

Pak

Profil letu	Spektrum let. zatížení	n_{hzvz}	n_{dzvz}
Akrobacie	Kahánek - akrobacie	3.05	1.34
Akrobacie	ZLIN-A	4.92	1.34
Přelet	ZLIN-N	2.1	1.34
Výcvik	ZLIN-N	1.9	1.34
Okruh	ZLIN-N	1.55	1.34
Aerovlek	Aerotechnik	1.8	1.34

Tab. 6 - násobky ZVZ

Poškození pro jednotlivá spektra obsažená v typickém letu jsou vypočtena pro sólo (S) a dvojí (D) obsazení jako podíl třídních četností n a počtu cyklů do poruchy N na všech hladinách napětí v daném spektru a následně sečtena podle

$$d_s = \sum \frac{n}{N}$$

$$d_D = \sum \frac{n}{N}$$

Součtem poškození od jednotlivých spekter dostáváme výsledné poškození za hodinu letu opět pro sólo nebo dvojí obsazení

$$D_s = \sum d_s$$

$$D_D = \sum d_D$$

Střední poškození pro daný profil letu je pak dáno vztahem

$$D = D_s \cdot k_s + D_D \cdot k_D$$

kde k_s a k_D jsou součinitelé zastoupení letů v sólo a dvojím obsazení (viz. tab. 5). Střední poškození je pak třeba vynásobit součinitelem k_p , který reprezentuje zastoupení příslušného profilu letu v rámci provozu letounu. Dostáváme tedy poškození pro kategorie A a N

$$d_A = k_{pA} \cdot D$$

$$d_N = k_{pN} \cdot D$$

a jejich součtem poškození pro dané kategorie podle vztahů

$$D_A = \sum d_A$$

$$D_N = \sum d_N$$

Střední životnost, tj. životnost s pravděpodobností poruchy 50%, dostaneme pak jako

$$L_{SA} = \frac{1}{D_A}$$

$$L_{SN} = \frac{1}{D_N}$$

Bezpečná životnost v dané kategorii provozu pak vychází ze vztahu

$$L_{BA} = \frac{L_{SA}}{j_B}$$

$$L_{BN} = \frac{L_{SN}}{j_B}$$

kde j_B značí součinitel spolehlivosti dle FAR 23, v případě tohoto výpočtu $j_B = 8$, jak vyžaduje oběžník [9]. Hodnota osm značí relativně vysokou úroveň bezpečnosti, z čehož vyplývá relativně vysoká rezerva ve výsledných údajích. Bezpečné životnosti budou také stanovovány dle součinitelů pro únavové zkoušky a sice pro $j_B = 4$ pro duralové konstrukce a $j_B = 5,383$ pro konstrukce ocelové, kde $R_m = 690 - 1380 \text{ MPa}$. Výpočet v takovém případě představuje odhad životnosti prokazatelné experimentálně.

Pro určení bezpečné životnosti při kombinovaném provozu v kategoriích A a N lze použít vztah

$$L_B = L_{B1A} + L_{B2N} = L_{B1A} + \frac{1 - j_B \cdot L_{B1A} \cdot D_A}{j_B \cdot D_N}$$

kde $L_{B1A} = 2300 \text{ LH}$ značí počet letových hodin při převedení letounu z kategorie A do třídy Normální a L_{B2N} je zbývající bezpečná životnost právě v této kategorii.

3.4 Výsledky únavového výpočtu

AKROBACIE	Kahánek A	Přistání	Odskok	Pojíždění	Z-V-Z	Celkem
S-N křivka	$d_s (LH^{-1})$	$d_s (LH^{-1})$	$d_s (LH^{-1})$	$d_s (LH^{-1})$	$d_s (LH^{-1})$	$D_s (LH^{-1})$
L200 V95	3.41E-04	6.01E-08	4.71E-09	2.09E-12	3.86E-05	3.80E-04
7075-T6	1.52E-04	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	3.37E-05	1.85E-04
E.02.01	1.52E-04	1.79E-08	1.89E-09	0.00E+00	2.62E-05	1.78E-04
R.A.E	9.69E-05	9.45E-08	7.69E-12	6.53E-98	2.39E-05	1.21E-04

AKROBACIE	ZLIN A	Přistání	Odskok	Pojíždění	Z-V-Z	Celkem
S-N křivka	$d_s (LH^{-1})$	$d_s (LH^{-1})$	$d_s (LH^{-1})$	$d_s (LH^{-1})$	$d_s (LH^{-1})$	$D_s (LH^{-1})$
L200 V95	1.88E-03	6.01E-08	4.71E-09	2.09E-12	2.65E-04	2.15E-03
7075-T6	2.17E-03	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	3.10E-04	2.48E-03
E.02.01	1.72E-03	1.79E-08	1.89E-09	0.00E+00	2.77E-04	2.00E-03
R.A.E	7.22E-04	9.45E-08	7.69E-12	6.53E-98	1.21E-04	8.43E-04

PŘELET	ZLIN N	Přistání	Odskok	Pojíždění	Z-V-Z	Celkem
S-N křivka	$d_s (LH^{-1})$	$d_s (LH^{-1})$	$d_s (LH^{-1})$	$d_s (LH^{-1})$	$d_s (LH^{-1})$	$D_s (LH^{-1})$
L200 V95	9.95E-06	1.70E-08	1.33E-09	5.92E-13	2.52E-06	1.25E-05
7075-T6	1.80E-06	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	7.65E-07	2.57E-06
E.02.01	3.82E-06	5.06E-09	5.36E-10	0.00E+00	1.14E-06	4.97E-06
R.A.E	5.37E-06	2.68E-08	4.36E-12	1.85E-98	2.12E-06	7.51E-06

VÝCVIK	ZLIN N	Přistání	Odskok	Pojíždění	Z-V-Z	Celkem
S-N křivka	$d_s (LH^{-1})$	$d_s (LH^{-1})$	$d_s (LH^{-1})$	$d_s (LH^{-1})$	$d_s (LH^{-1})$	$D_s (LH^{-1})$
L200 V95	9.95E-06	3.41E-08	2.67E-09	1.18E-12	3.39E-06	1.34E-05
7075-T6	1.80E-06	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	5.64E-07	2.37E-06
E.02.01	3.82E-06	1.01E-08	1.07E-09	0.00E+00	1.40E-06	5.24E-06
R.A.E	5.37E-06	5.36E-08	4.36E-12	3.70E-98	3.13E-06	8.55E-06

OKRUH	ZLIN N	Přistání	Odskok	Pojíždění	Z-V-Z	Celkem
S-N křivka	$d_s (LH^{-1})$	$d_s (LH^{-1})$	$d_s (LH^{-1})$	$d_s (LH^{-1})$	$d_s (LH^{-1})$	$D_s (LH^{-1})$
L200 V95	9.95E-06	1.70E-07	1.33E-08	5.92E-12	7.46E-06	1.76E-05
7075-T6	1.80E-06	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	7.35E-08	1.88E-06
E.02.01	3.82E-06	5.06E-08	5.36E-09	0.00E+00	2.68E-06	6.56E-06
R.A.E	5.37E-06	2.68E-07	2.18E-11	1.85E-97	8.38E-06	1.40E-05

VLEKÁNÍ	Aerotech	Přistání	Odskok	Pojíždění	Z-V-Z	Celkem
S-N křivka	$d_s (LH^{-1})$	$d_s (LH^{-1})$	$d_s (LH^{-1})$	$d_s (LH^{-1})$	$d_s (LH^{-1})$	$D_s (LH^{-1})$
L200 V95	1.38E-05	8.18E-08	6.41E-09	2.84E-12	6.56E-06	2.05E-05
7075-T6	2.01E-06	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	6.96E-07	2.70E-06
E.02.01	4.51E-06	2.43E-08	2.58E-09	0.00E+00	2.60E-06	7.14E-06
R.A.E	6.02E-06	1.29E-07	1.05E-11	8.88E-98	6.38E-06	1.25E-05

Tab. 7 - Únavová poškození křídla v kategorii A pro sólo obsazení

AKROBACIE	Kahánek A	Přistání	Odskok	Pojíždění	Z-V-Z	Celkem
S-N křivka	$d_D (LH^{-1})$	$d_D (LH^{-1})$	$d_D (LH^{-1})$	$d_D (LH^{-1})$	$d_D (LH^{-1})$	$D_D (LH^{-1})$
L200 V95	5.94E-04	1.06E-07	9.52E-09	2.09E-12	6.10E-05	6.55E-04
7075-T6	2.65E-04	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	6.16E-05	3.26E-04
E.02.01	2.82E-04	3.05E-08	3.36E-09	0.00E+00	4.71E-05	3.29E-04
R.A.E	1.56E-04	1.82E-07	2.84E-11	6.53E-98	3.53E-05	1.91E-04

AKROBACIE	ZLIN A	Přistání	Odskok	Pojíždění	Z-V-Z	Celkem
S-N křivka	$d_D (LH^{-1})$	$d_D (LH^{-1})$	$d_D (LH^{-1})$	$d_D (LH^{-1})$	$d_D (LH^{-1})$	$D_D (LH^{-1})$
L200 V95	3.15E-03	1.06E-07	9.52E-09	2.09E-12	4.33E-04	3.58E-03
7075-T6	3.49E-03	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	4.94E-04	3.98E-03
E.02.01	3.09E-03	3.05E-08	3.36E-09	0.00E+00	4.74E-04	3.56E-03
R.A.E	1.08E-03	1.82E-07	2.84E-11	6.53E-98	1.79E-04	1.26E-03

PŘELET	ZLIN N	Přistání	Odskok	Pojíždění	Z-V-Z	Celkem
S-N křivka	$d_D (LH^{-1})$	$d_D (LH^{-1})$	$d_D (LH^{-1})$	$d_D (LH^{-1})$	$d_D (LH^{-1})$	$D_D (LH^{-1})$
L200 V95	1.66E-05	2.99E-08	2.70E-09	5.92E-13	3.99E-06	2.07E-05
7075-T6	4.07E-06	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	1.94E-06	6.01E-06
E.02.01	7.06E-06	8.63E-09	9.53E-10	0.00E+00	2.04E-06	9.11E-06
R.A.E	8.69E-06	5.16E-08	8.05E-12	1.85E-98	3.02E-06	1.18E-05

VÝCVIK	ZLIN N	Přistání	Odskok	Pojíždění	Z-V-Z	Celkem
S-N křivka	$d_D (LH^{-1})$	$d_D (LH^{-1})$	$d_D (LH^{-1})$	$d_D (LH^{-1})$	$d_D (LH^{-1})$	$D_D (LH^{-1})$
L200 V95	1.66E-05	5.98E-08	5.40E-09	1.18E-12	5.38E-06	2.21E-05
7075-T6	4.07E-06	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	1.76E-06	5.83E-06
E.02.01	7.06E-06	1.73E-08	1.91E-09	0.00E+00	2.48E-06	9.56E-06
R.A.E	8.69E-06	1.03E-07	1.61E-11	3.70E-98	4.46E-06	1.33E-05

OKRUH	ZLIN N	Přistání	Odskok	Pojíždění	Z-V-Z	Celkem
S-N křivka	$d_D (LH^{-1})$	$d_D (LH^{-1})$	$d_D (LH^{-1})$	$d_D (LH^{-1})$	$d_D (LH^{-1})$	$D_D (LH^{-1})$
L200 V95	1.66E-05	2.99E-07	2.70E-08	5.92E-12	1.20E-05	2.89E-05
7075-T6	4.07E-06	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	9.02E-07	4.97E-06
E.02.01	7.06E-06	8.63E-08	9.53E-09	0.00E+00	4.62E-06	1.18E-05
R.A.E	8.69E-06	5.16E-07	8.05E-11	1.85E-97	1.20E-05	2.12E-05

VLEKÁNÍ	Aerotech	Přistání	Odskok	Pojíždění	Z-V-Z	Celkem
S-N křivka	$d_D (LH^{-1})$	$d_D (LH^{-1})$	$d_D (LH^{-1})$	$d_D (LH^{-1})$	$d_D (LH^{-1})$	$D_D (LH^{-1})$
L200 V95	2.36E-05	1.44E-07	1.30E-08	2.84E-12	1.04E-05	3.42E-05
7075-T6	4.58E-06	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	4.58E-06
E.02.01	8.36E-06	4.14E-08	4.57E-09	0.00E+00	4.56E-06	1.30E-05
R.A.E	1.01E-05	2.48E-07	3.87E-11	8.88E-98	9.09E-06	1.94E-05

Tab. 8 - Únavová poškození křídla v kategorii A pro dvojí obsazení

AKROBACIE	Kahánek A	Přistání	Odskok	Pojíždění	Z-V-Z	Celkem
S-N křivka	$d_s (LH^{-1})$	$d_s (LH^{-1})$	$d_s (LH^{-1})$	$d_s (LH^{-1})$	$d_s (LH^{-1})$	$D_s (LH^{-1})$
Nosník Z226 T	1.90E-05	1.15E-80	9.13E-107	5.88E-212	3.93E-06	2.29E-05

AKROBACIE	ZLIN A	Přistání	Odskok	Pojíždění	Z-V-Z	Celkem
S-N křivka	$d_s (LH^{-1})$	$d_s (LH^{-1})$	$d_s (LH^{-1})$	$d_s (LH^{-1})$	$d_s (LH^{-1})$	$D_s (LH^{-1})$
Nosník Z226 T	2.43E-04	1.15E-80	9.13E-107	5.88E-212	3.66E-05	2.79E-04

PŘELET	ZLIN N	Přistání	Odskok	Pojíždění	Z-V-Z	Celkem
S-N křivka	$d_s (LH^{-1})$	$d_s (LH^{-1})$	$d_s (LH^{-1})$	$d_s (LH^{-1})$	$d_s (LH^{-1})$	$D_s (LH^{-1})$
Nosník Z226 T	1.53E-07	1.15E-80	0.00E+00	1.66E-212	3.87E-17	1.53E-07

VÝCVIK	ZLIN N	Přistání	Odskok	Pojíždění	Z-V-Z	Celkem
S-N křivka	$d_s (LH^{-1})$	$d_s (LH^{-1})$	$d_s (LH^{-1})$	$d_s (LH^{-1})$	$d_s (LH^{-1})$	$D_s (LH^{-1})$
Nosník Z226 T	1.53E-07	6.53E-81	5.18E-107	3.33E-212	7.98E-23	1.53E-07

OKRUH	ZLIN N	Přistání	Odskok	Pojíždění	Z-V-Z	Celkem
S-N křivka	$d_s (LH^{-1})$	$d_s (LH^{-1})$	$d_s (LH^{-1})$	$d_s (LH^{-1})$	$d_s (LH^{-1})$	$D_s (LH^{-1})$
Nosník Z226 T	1.53E-07	3.27E-80	2.59E-106	1.66E-211	2.98E-34	1.53E-07

VLEKÁNÍ	Aerotech	Přistání	Odskok	Pojíždění	Z-V-Z	Celkem
S-N křivka	$d_s (LH^{-1})$	$d_s (LH^{-1})$	$d_s (LH^{-1})$	$d_s (LH^{-1})$	$d_s (LH^{-1})$	$D_s (LH^{-1})$
Nosník Z226 T	1.65E-07	1.57E-80	1.24E-106	7.99E-212	1.13E-25	1.65E-07

Tab. 9 - Únavová poškození centroplánu v kategorii A pro sólo obsazení

AKROBACIE	Kahánek A	Přistání	Odskok	Pojíždění	Z-V-Z	Celkem
S-N křivka	$d_D (LH^{-1})$	$d_D (LH^{-1})$	$d_D (LH^{-1})$	$d_D (LH^{-1})$	$d_D (LH^{-1})$	$D_D (LH^{-1})$
Nosník Z226 T	3.18E-05	9.05E-77	2.73E-101	3.64E-229	8.39E-06	4.02E-05

AKROBACIE	ZLIN A	Přistání	Odskok	Pojíždění	Z-V-Z	Celkem
S-N křivka	$d_D (LH^{-1})$	$d_D (LH^{-1})$	$d_D (LH^{-1})$	$d_D (LH^{-1})$	$d_D (LH^{-1})$	$D_D (LH^{-1})$
Nosník Z226 T	3.63E-04	9.05E-77	2.73E-101	3.64E-229	5.12E-05	4.14E-04

PŘELET	ZLIN N	Přistání	Odskok	Pojíždění	Z-V-Z	Celkem
S-N křivka	$d_D (LH^{-1})$	$d_D (LH^{-1})$	$d_D (LH^{-1})$	$d_D (LH^{-1})$	$d_D (LH^{-1})$	$D_D (LH^{-1})$
Nosník Z226 T	3.79E-07	2.56E-77	7.73E-102	1.03E-229	1.64E-10	3.79E-07

VÝCVIK	ZLIN N	Přistání	Odskok	Pojíždění	Z-V-Z	Celkem
S-N křivka	$d_D (LH^{-1})$	$d_D (LH^{-1})$	$d_D (LH^{-1})$	$d_D (LH^{-1})$	$d_D (LH^{-1})$	$D_D (LH^{-1})$
Nosník Z226 T	3.79E-07	5.13E-77	1.55E-101	2.06E-229	2.99E-16	3.79E-07

OKRUH	ZLIN N	Přistání	Odskok	Pojíždění	Z-V-Z	Celkem
S-N křivka	$d_D (LH^{-1})$	$d_D (LH^{-1})$	$d_D (LH^{-1})$	$d_D (LH^{-1})$	$d_D (LH^{-1})$	$D_D (LH^{-1})$
Nosník Z226 T	3.79E-07	2.56E-76	7.73E-101	1.03E-228	8.45E-28	3.79E-07

VLEKÁNÍ	Aerotech	Přistání	Odskok	Pojíždění	Z-V-Z	Celkem
S-N křivka	$d_D (LH^{-1})$	$d_D (LH^{-1})$	$d_D (LH^{-1})$	$d_D (LH^{-1})$	$d_D (LH^{-1})$	$D_D (LH^{-1})$
Nosník Z226 T	4.01E-07	1.23E-76	3.71E-101	4.95E-229	3.97E-19	4.01E-07

Tab. 10 - Únavová poškození centroplánu v kategorii A pro dvojí obsazení

VLEKÁNÍ	Aerotech	Přistání	Odskok	Pojíždění	Z-V-Z	Celkem
S-N křivka	$d_s (LH^{-1})$	$d_s (LH^{-1})$	$d_s (LH^{-1})$	$d_s (LH^{-1})$	$d_s (LH^{-1})$	$D_s (LH^{-1})$
L200 V95	2.23E-05	1.35E-07	1.20E-08	2.84E-12	9.94E-06	3.24E-05
7075-T6	4.20E-06	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	2.30E-06	6.50E-06
E.02.01	7.83E-06	3.91E-08	4.30E-09	0.00E+00	4.30E-06	1.22E-05
R.A.E	9.50E-06	2.33E-07	3.37E-11	8.88E-98	8.75E-06	1.85E-05

Tab. 11 - Únavová poškození křídla v kategorii N pro sólo obsazení

VLEKÁNÍ	Aerotech	Přistání	Odskok	Pojíždění	Z-V-Z	Celkem
S-N křivka	$d_D (LH^{-1})$	$d_D (LH^{-1})$	$d_D (LH^{-1})$	$d_D (LH^{-1})$	$d_D (LH^{-1})$	$D_D (LH^{-1})$
L200 V95	3.41E-05	2.12E-07	2.09E-08	2.84E-12	1.44E-05	4.88E-05
7075-T6	7.95E-06	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	5.35E-06	1.33E-05
E.02.01	1.29E-05	6.09E-08	6.94E-09	0.00E+00	6.83E-06	1.98E-05
R.A.E	1.42E-05	3.70E-07	1.11E-10	8.88E-98	1.17E-05	2.63E-05

Tab. 12 - Únavová poškození křídla v kategorii N pro dvojí obsazení

VLEKÁNÍ	Aerotech	Přistání	Odskok	Pojíždění	Z-V-Z	Celkem
S-N křivka	$d_s (LH^{-1})$	$d_s (LH^{-1})$	$d_s (LH^{-1})$	$d_s (LH^{-1})$	$d_s (LH^{-1})$	$D_s (LH^{-1})$
Nosník Z226 T	3.69E-07	4.25E-75	9.15E-101	7.99E-212	1.83E-19	3.69E-07

Tab. 13 - Únavová poškození centroplánu v kategorii N pro sólo obsazení

VLEKÁNÍ	Aerotech	Přistání	Odskok	Pojíždění	Z-V-Z	Celkem
S-N křivka	$d_D (LH^{-1})$	$d_D (LH^{-1})$	$d_D (LH^{-1})$	$d_D (LH^{-1})$	$d_D (LH^{-1})$	$D_D (LH^{-1})$
Nosník Z226 T	8.37E-07	3.92E-72	1.98E-96	4.95E-229	3.47E-14	8.37E-07

Tab. 14 - Únavová poškození centroplánu v kategorii N pro dvojí obsazení

Kat. A	Spektrum	S-N křivka	D _S (LH ⁻¹)	D _D (LH ⁻¹)	k _S	k _D	D (LH ⁻¹)	k _p	d _A (LH ⁻¹)
Profil letu	Kahánek A	L200 V95	3.80E-04	6.55E-04	0.65	0.35	4.76E-04	0.4	1.90E-04
Akrobacie		7075-T6	1.85E-04	3.26E-04			2.35E-04		9.39E-05
		E.02.01	1.78E-04	3.29E-04			2.31E-04		9.24E-05
		R.A.E	1.21E-04	1.91E-04			1.46E-04		5.82E-05
Přelet	ZLIN N	L200 V95	1.25E-05	2.07E-05	0.5	0.5	1.66E-05	0.2	2.49E-06
		7075-T6	2.57E-06	6.01E-06			4.29E-06		6.43E-07
		E.02.01	4.97E-06	9.11E-06			7.04E-06		1.06E-06
		R.A.E	7.51E-06	1.18E-05			9.64E-06		1.45E-06
Výcvik		L200 V95	1.34E-05	2.21E-05	0.5	0.5	1.77E-05	0.2	2.66E-06
		7075-T6	2.37E-06	5.83E-06			4.10E-06		6.15E-07
		E.02.01	5.24E-06	9.56E-06			7.40E-06		1.11E-06
		R.A.E	8.55E-06	1.33E-05			1.09E-05		1.64E-06
Okruh		L200 V95	1.76E-05	2.89E-05	0.5	0.5	2.33E-05	0.2	3.49E-06
		7075-T6	1.88E-06	4.97E-06			3.42E-06		5.13E-07
		E.02.01	6.56E-06	1.18E-05			9.17E-06		1.38E-06
		R.A.E	1.40E-05	2.12E-05			1.76E-05		2.64E-06
Vlek	Aerotech	L200 V95	2.05E-05	3.42E-05	0.5	0.5	2.73E-05	0.2	4.10E-06
		7075-T6	2.70E-06	4.58E-06			3.64E-06		5.46E-07
		E.02.01	7.14E-06	1.30E-05			1.01E-05		1.51E-06
		R.A.E	1.25E-05	1.94E-05			1.60E-05		2.40E-06

S-N křivka	$D_A (LH^{-1})$	$L_{SA} (LH)$	$L_{BA}(LH) j_B=4$	$L_{BA}(LH) j_B=8$
L200 V95	2.03E-04	4922	1231	615
7075-T6	9.62E-05	10394	2598	1299
E.02.01	9.75E-05	10260	2565	1283
R.A.E	6.63E-05	15078	3770	1885

Tab. 15 - hodinové poškození křídla pro kat. A

Kat. N	Spektrum	S-N křivka	D _S (LH ⁻¹)	D _D (LH ⁻¹)	k _S	k _D	D (LH ⁻¹)	k _p	d _N (LH ⁻¹)
Profil letu	Aerotech	L200 V95	3.24E-05	4.88E-05	0.5	0.5	4.06E-05	1	4.06E-05
Vlek		7075-T6	6.50E-06	1.33E-05			9.90E-06		9.90E-06
		E.02.01	1.22E-05	1.98E-05			1.60E-05		1.60E-05
		R.A.E	1.85E-05	2.63E-05			2.24E-05		2.24E-05

S-N křivka	$D_N (LH^{-1})$	$L_{SN} (LH)$	$L_{BN}(LH) j_B=4$	$L_{BN}(LH) j_B=8$
L200 V95	4.06E-05	24642	6160	3080
7075-T6	9.90E-06	100999	25250	12625
E.02.01	1.60E-05	62558	15639	7820
R.A.E	2.24E-05	44696	11174	5587

Tab. 16 - hodinové poškození křídla pro kat. N

S-N křivka	$L_{B2N} (LH)$	$L_B (LH)$
L200 V95	-5354	-3054
7075-T6	2900	5200
E.02.01	1616	3916
R.A.E	4356	6656

Tab. 17 - celková bezpečná životnost křídla pro kombinovaný provoz v kat. N a A

Kat. A	Spektrum	S-N křivka	D _S (LH ⁻¹)	D _D (LH ⁻¹)	k _S	k _D	D (LH ⁻¹)	k _P	d _A (LH ⁻¹)
Profil letu	ZLIN A (sólo) Kahánek A (dvojí)	L200 V95	2.15E-03	6.55E-04	0.65	0.35	1.63E-03	0.4	6.50E-04
Akrobacie		7075-T6	2.48E-03	3.26E-04			1.72E-03		6.90E-04
		E.02.01	2.00E-03	3.29E-04			1.42E-03		5.66E-04
		R.A.E	8.43E-04	1.91E-04			6.15E-04		2.46E-04
Přelet	ZLIN N	L200 V95	1.25E-05	2.07E-05	0.5	0.5	1.66E-05	0.2	2.49E-06
		7075-T6	2.57E-06	6.01E-06			4.29E-06		6.43E-07
		E.02.01	4.97E-06	9.11E-06			7.04E-06		1.06E-06
		R.A.E	7.51E-06	1.18E-05			9.64E-06		1.45E-06
Výcvik		L200 V95	1.34E-05	2.21E-05	0.5	0.5	1.77E-05	0.2	2.66E-06
		7075-T6	2.37E-06	5.83E-06			4.10E-06		6.15E-07
		E.02.01	5.24E-06	9.56E-06			7.40E-06		1.11E-06
		R.A.E	8.55E-06	1.33E-05			1.09E-05		1.64E-06
Okruh		L200 V95	1.76E-05	2.89E-05	0.5	0.5	2.33E-05	0.2	3.49E-06
		7075-T6	1.88E-06	4.97E-06			3.42E-06		5.13E-07
		E.02.01	6.56E-06	1.18E-05			9.17E-06		1.38E-06
		R.A.E	1.40E-05	2.12E-05			1.76E-05		2.64E-06
Vlek	Aerotech	L200 V95	2.05E-05	3.42E-05	0.5	0.5	2.73E-05	0.2	4.10E-06
		7075-T6	2.70E-06	4.58E-06			3.64E-06		5.46E-07
		E.02.01	7.14E-06	1.30E-05			1.01E-05		1.51E-06
		R.A.E	1.25E-05	1.94E-05			1.60E-05		2.40E-06

S-N křivka	$D_A (LH^{-1})$	$L_{SA} (LH)$	$L_{BA}(LH) j_B=4$	$L_{BA}(LH) j_B=8$
L200 V95	6.63E-04	1508	377	189
7075-T6	6.92E-04	1445	361	181
E.02.01	5.71E-04	1751	438	219
R.A.E	2.54E-04	3936	984	492

Tab. 18 - výsledné hodinové poškození křídla v kat. A

Kat. A	Spektrum	S-N křivka	D _S (LH ⁻¹)	D _D (LH ⁻¹)	k _S	k _D	D (LH ⁻¹)	k _p	d _A (LH ⁻¹)
Akrobacie	Kah. A	Z 226 T Nosník	2.29E-05	4.02E-05	0.65	0.35	2.90E-05	0.4	1.16E-05
Přelet	ZLIN N		1.53E-07	3.79E-07	0.5	0.5	2.66E-07	0.2	3.99E-08
Výcvik			1.53E-07	3.79E-07	0.5	0.5	2.66E-07	0.2	3.99E-08
Okruh			1.53E-07	3.79E-07	0.5	0.5	2.66E-07	0.2	3.99E-08
Vlek	Aerotech		1.65E-07	4.01E-07	0.5	0.5	2.83E-07	0.2	4.25E-08

S-N křivka	$D_A (LH^{-1})$	$L_{SA} (LH)$	$L_{BA}(LH)j_B=5,383$	$L_{BA}(LH) j_B=8$
Z 226 T	1.17E-05	85134	15815	10642

Tab. 19 - hodinové poškození centroplánu v kat. A

Kat. N	Spektrum	S-N křivka	$D_S (LH^{-1})$	$D_D (LH^{-1})$	k_S	k_D	$D (LH^{-1})$	k_p	$d_N (LH^{-1})$
Vlek	Aerotech	Z 226 T	3.69E-07	8.37E-07	0.5	0.5	6.03E-07	1	6.03E-07

S-N křivka	$D_N (LH^{-1})$	$L_{SN} (LH)$	$L_{BN}(LH)j_B=5,383$	$L_{BN}(LH) j_B=8$
Z 226 T	6.03E-07	1658532	308105	207316

Tab. 20 - hodinové poškození centroplánu v kat. N

S-N křivka	$L_{B2N}(LH)j_B=5,383$	$L_B(LH)j_B=5,383$	$L_{B2N}(LH)j_B=8$	$L_B (LH) j_B=8$
Z 226 T	263298	265598	162509	164809

Tab. 21 - bezpečná životnost centroplánu v kombinovaném provozu

Kat. A	Spektrum	S-N křivka	D _S (LH ⁻¹)	D _D (LH ⁻¹)	k _S	k _D	D (LH ⁻¹)	k _p	d _A (LH ⁻¹)
Akrobacie	Kah. A s. ZLIN A dv.	Z 226 T Nosník	2.79E-04	4.02E-05	0.65	0.35	1.96E-04	0.4	7.83E-05
Přelet	ZLIN N		1.53E-07	3.79E-07	0.5	0.5	2.66E-07	0.2	3.99E-08
Výcvik			1.53E-07	3.79E-07	0.5	0.5	2.66E-07	0.2	3.99E-08
Okruh			1.53E-07	3.79E-07	0.5	0.5	2.66E-07	0.2	3.99E-08
Vlek	Aerotech		1.65E-07	4.01E-07	0.5	0.5	2.83E-07	0.2	4.25E-08

S-N křivka	$D_A (LH^{-1})$	$L_{SA} (LH)$	$L_{BA}(LH)j_B=5,383$	$L_{BA}(LH) j_B=8$
Z 226 T	7.84E-05	12750	2369	1594

Tab. 22 - bezpečná životnost centroplánu pro kat. A s lety v sólo obsazení dle ZLIN-A

S-N křivka	$L_{B2N}(LH)j_B=5,383$	$L_B(LH)j_B=5,383$	$L_{B2N}(LH)j_B=8$	$L_B (LH) j_B=8$
Z 226 T	8922	11222	-91867	-89567

Tab. 23 - bezpečná životnost centropł. v kombinovaném provozu s akr. lety v sólo obsazení dle ZLIN-A



Obr. 8 - příhradová konstrukce trupu Z 226 po GO

3.5 Závěry plynoucí z únavových výpočtů

V případě uvažování životnosti centroplánu na základě značně konzervativního součinitele spolehlivosti $j_B = 8$ v kombinovaném provozu je bezpečná životnost stanovena na 164 809 LH. Tato hodnota však vychází z relativně mírného akrobatického spektra Kahánek a je tudíž nutné brát ji s rezervou. Celkový počet 11 222 letových hodin centroplánu pro "tvrdší" spektrum kombinace "ZLIN-A sólo / Kahánek akrobacie dvojí" se pak jeví jako reálnější, ale stále dostatečně vysoká hodnota umožňující prodloužení stávajícího limitu bezpečné únavové životnosti letounů ZLIN řady 26.

Z hlediska životnosti křídla je však toto podmíněno výměnou jeho pásnice, neboť jak je zřejmé z tab. 25 jeho životnost nad rámec stávajícího limitu prodloužit nelze. Naproti tomu životnost křídla s novými pásnicemi dle tab. 26 dosahuje cca 12000 LH a umožní tedy prodloužení celkové životnosti letounu z 5 500 až na přibližně 11 000 LH.

Akrobacie	Kahánek akrobacie		ZLIN-A sólo, Kah. A dvojí	
S-N křivka	$L_B(LH)_{j_B=8}$	$L_B(LH)_{j_B=5.383}$	$L_B(LH)_{j_B=8}$	$L_B(LH)_{j_B=5.383}$
Z-226 T	164809	265598	---	11222

Tab. 24 - bezpečná životnost centroplánu v kombinovaném provozu

Akrobacie	Kahánek akrobacie		ZLIN-A sólo, Kah. A dvojí	
S-N křivka	$L_B(LH)_{j_B=8}$	$L_B(LH)_{j_B=4}$	$L_B(LH)_{j_B=8}$	$L_B(LH)_{j_B=4}$
L200 V95	---	---	---	---
7075 T6	---	5200	---	---
E.02.01	---	3916	---	---
R.A.E	---	6656	---	---

Tab. 25 - bezpečná životnost křídla v kombinovaném provozu

Vlekání	Aerotechnik	
S-N křivka	$L_{BN}(LH)_{j_B=8}$	$L_{BN}(LH)_{j_B=4}$
L200 V95	3080	6160
7075 T6	12625	25250
E.02.01	7820	15639
R.A.E	5587	11174

Tab. 26 - bezpečná životnost křídla s novými pásnicemi při provozu v kat. N

4. VÝBĚR MATERIÁLU A POSOUZENÍ JEHO ÚNAVOVÝCH VLASTNOSTÍ

4.1 Výběr materiálu

Jako náhradu materiálu pro výrobu pásnic je logické požadovat úhelníkový polotovar z hliníkové slitiny, která bude pevnostními a únavovými charakteristikami pokud možno co nejbližší původnímu materiálu Z 424222.71 (ASM USA: 7075, složení ALZn6Mg2Cu). Zároveň je nutné dodržet také původní geometrii pásnic, resp. průběžnou plochu jejich průřezu a úhel.

Po emailové komunikaci se společností Primapol, která byla vyhodnocena jako nejlepší možný dodavatel polotovaru pro výrobu pásnic, vzhledem ke svému sídlu v České republice a schopnosti nabídnout širokou škálu polotovarů, jsem byl ujištěn, že společnost je schopna dodat požadovaný materiál v rozličných formách.

Pro výběr materiálu byly určující požadavky jako; podobnost chemického složení s materiálem Z 424222.71, ale také pevnostní a únavové charakteristiky stejné nebo vyšší úrovně. Po srovnání předběžného výběru materiálů s nabídkou společnosti Primapol byl tedy nakonec pro výrobu pásnic vybrán materiál s označením 7075-T6.

Duralové slitiny řady 7075 jsou materiály s obsahem zinku jako hlavního prvku. Jejich pevnost je srovnatelná s řadou ocelí, mají dobrou únavovou životnost a obrobitelnost. Označení T6 značí tepelnou úpravu rozpouštěcím žíháním, kalením a následným umělým stárnutím.

4.2 Srovnání materiálů

a) Chemické složení

%	Z424222.71	7075-T6
Cr	-	0.18 - 0.28
Cu	1.4 - 2.0	1.2 - 2
Fe	max 0.5	max 0.5
Mg	1.8 - 2.8	2.1 - 2.9
Mn	0.2 - 0.6	max 0.3
Si	max 0.5	max 0.4
Ti	-	max 0.2
Zn	5.0 - 7.0	5.1 - 6.1
Zr	-	-
Al	zbytek	87.1 - 91.4

Tab. 27 - porovnání chem. složení

b) Mechanické vlastnosti

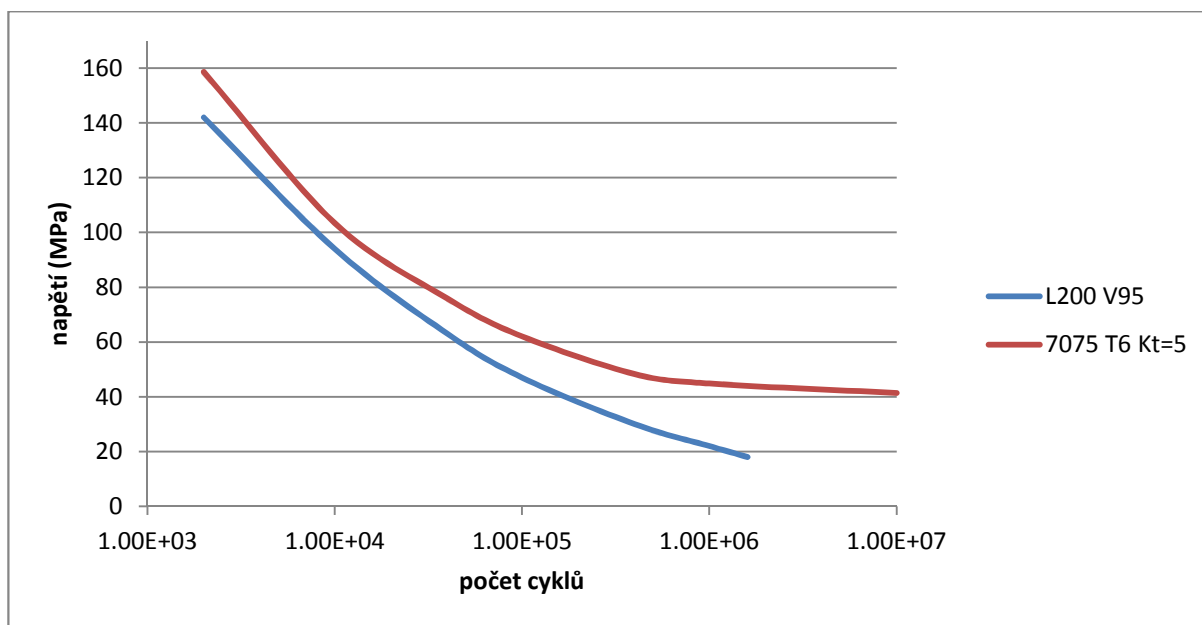
	Z424222.71	7075-T6
R _m (MPa)	min 500	524
R _e (MPa)	430	448
A (%)	7	5 - 9
* hodnoty pro profil do tl. stěny 10mm		

Tab. 28 - porovnání mech. vlastností

Navržená náhrada vykazuje mez pevnosti v tahu vyšší o 4,8%.

4.3 Posouzení únavových vlastností

Jak je patrné z porovnání křivek v grafu 4, materiál 7075-T6 má i přes záměrně zvolenou vrubovitost $K_t = 5$ předpoklady pro navýšení životnosti křídla, což bylo také dokázáno únavovým výpočtem.



Graf 4 - porovnání původního a nového materiálu pásnic křídla

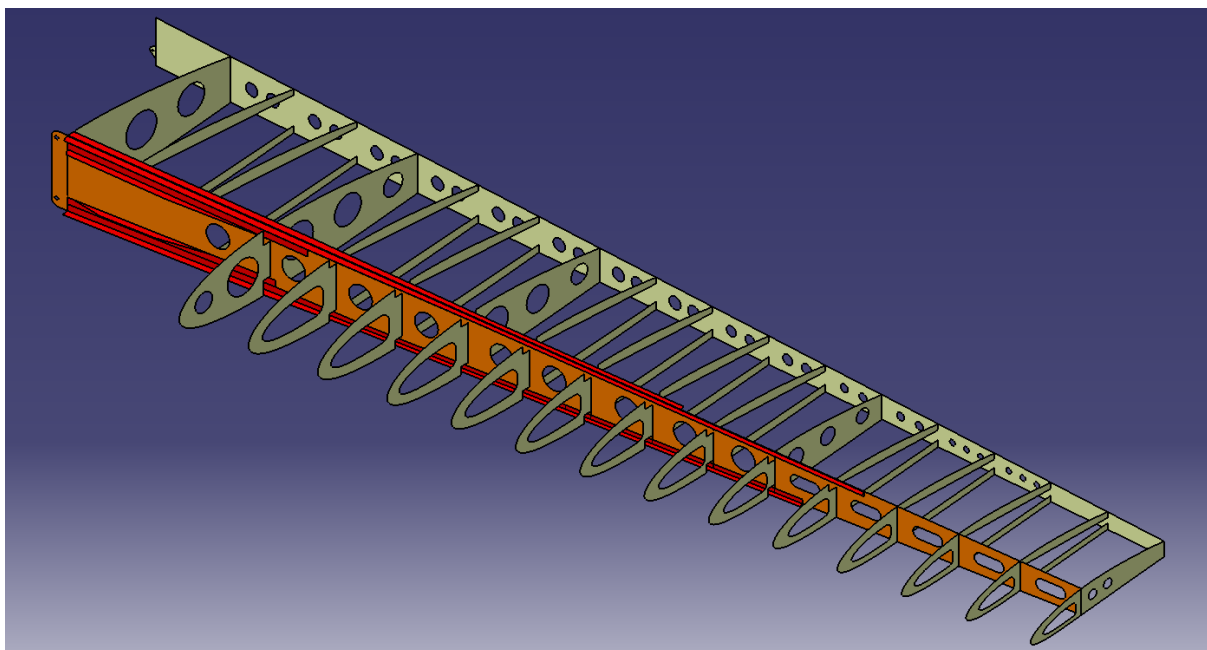
V kombinovaném provozu je životnost křídla s novými pásnicemi 5200 LH, a ve srovnání se stávajícím materiálem pásnic v kategorii provozu Normal pro součinitel spolehlivosti $j_B = 8$ bylo dosaženo hodnoty 12625 LH oproti 3080 LH materiálu V95. Za použití součinitele spolehlivosti $j_B = 4$ pak bylo dokonce dosaženo 25250 LH oproti 6160 LH pro původní materiál.

Materiál 7075-T6 tímto tedy splnil požadavky kladené na jeho použití a dokonce pomohl k navýšení současné životnosti křídla.

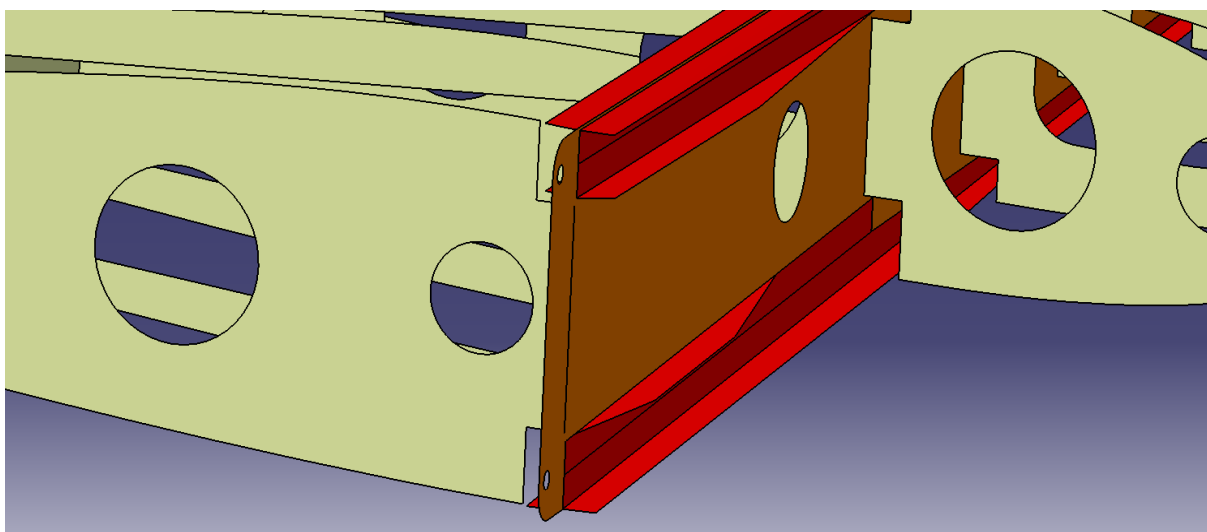
5. NÁVRH TECHNOLOGICKÉHO POSTUPU PŘESTAVBY KŘÍDLA

Tento postup, jehož primárním účelem je popis výměny pásnic hlavního nosníku křídla za nové, byl sestaven na základě konzultací s osvědčujícím personálem a vedením organizace údržby ZLÍN-AVION service, s.r.o.

Během následujícího postupu uvažujeme křídlo demontované z trupu letadla, zbavené kořenového snímacího krytu a nehybně ustavené na podstavcích. Pro výměnu pásnic je nutné odstranit potah náběžné části křídla včetně některé výstroje, kterou křídlo ukrývá tak, aby mohl mechanik pohodlně odvrátit nýty spojující pásnice se stojinou a poté na ni nanýtovat pásnice nové.



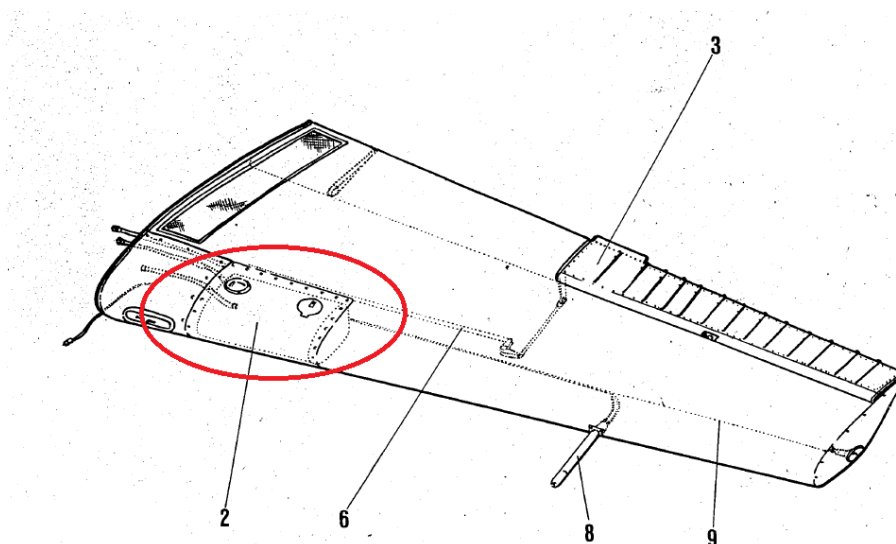
Obr. 9 - kostra křídla Z 226 vč. pásnic (CATIA)



Obr. 10 - uspořádání pásnic v systému hlavního nosníku (CATIA)

5.1 Výměna pásnic

- 1) Demontujte kryt nádrže a nádrž (poz. 2, obr. 11)



Obr. 11 - označení krytu nádrže

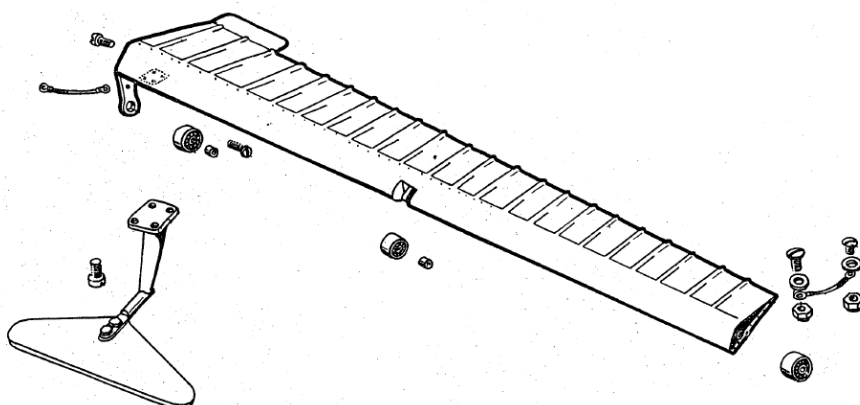
Uvolnit a vyjmout spojovací materiál. Demontovaný spojovací materiál vizuálně kontrolovat, poškozený vyměnit za nový a uložit k následné montáži. Kryt nádrže zkontrolovat na deformace a trhliny, trhliny v místě prosazení šroubů M5 opravit nanýtováním nerezových podložek 5 LDN. Kryt uložit k následné montáži.

Demontovat nádrž, vizuálně zkontrolovat poškození, deformace, netěsnost. Provést případné opravy a uložit. Poutací pásy nádrže demontovat, zkontrolovat na trhliny, případně opravit nebo vyměnit a uložit.

- 2) Demontujte okrajový oblouk a křídélko (poz. 3, obr. 11)

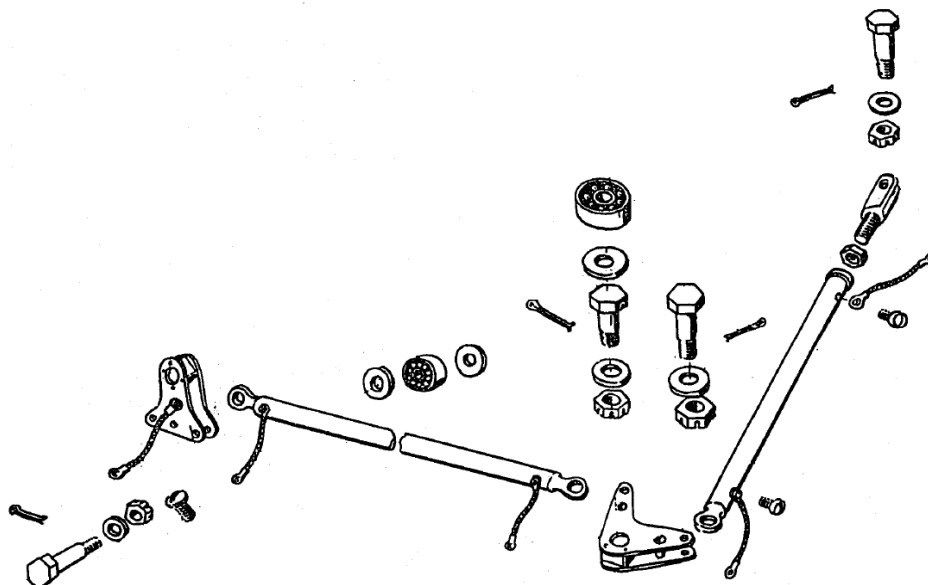
Demontovaný spojovací materiál vizuálně kontrolovat, poškozený vyměnit za nový a uložit k následné montáži. Okrajový oblouk zkontrolovat na deformace a trhliny. Trhliny v místě prosazení šroubů M5 opravit nanýtováním nerezových podložek 5 LDN. Kryt uložit k následné montáži.

Křídélko demontovat, zkontrolovat na deformace a poškození, případně opravit, uložit.



Obr. 12 - křídélko

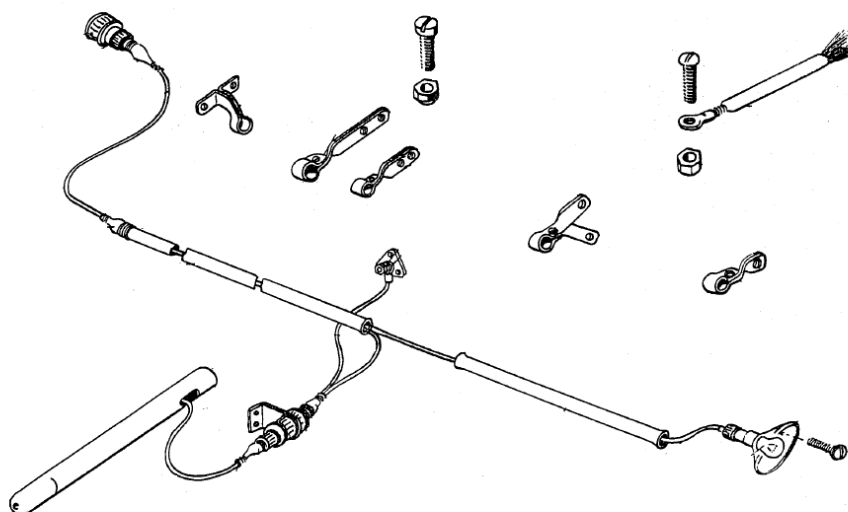
- 3) Demontujte úhlové páky a táhla řízení (poz. 6, obr. 11)



Obr. 13 - táhla řízení a úhlové páky

Demontovaný spojovací materiál a táhla vizuálně kontrolovat, poškozený vyměnit za nový a uložit k následné montáži. Vadná a zkorodovaná ložiska vyměnit za nová. Díly uložit k následné montáži.

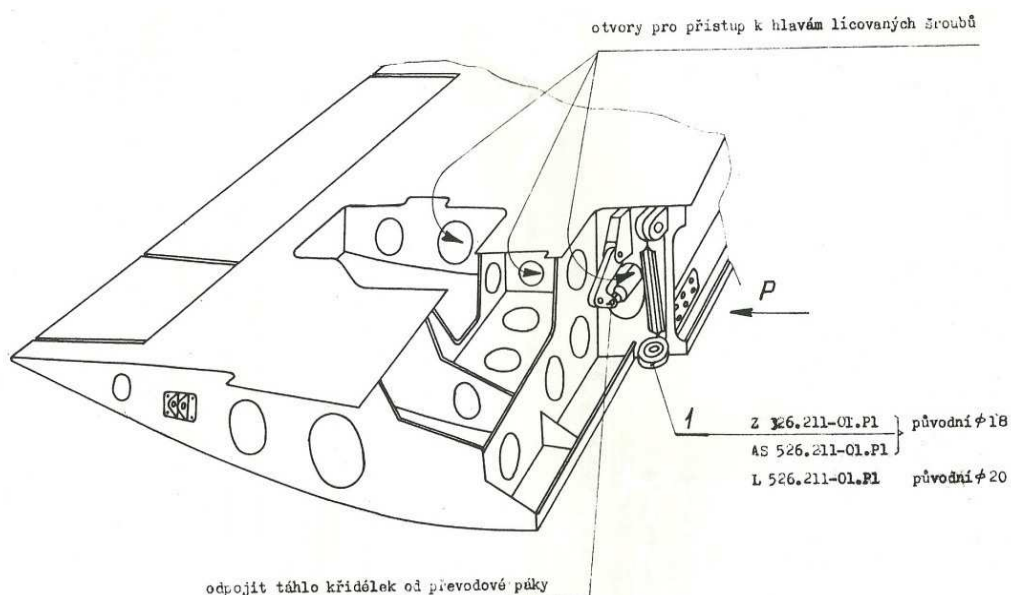
4) Demontujte pitot-statickou hubici a elektroinstalaci (poz. 8, 9, obr. 11)



Obr. 14 - el. instalace a pitot-statický systém

Pouze u levého křídla. Demontujte sestavu pitotovy hubice a držáku s hadicemi pitot-statického systému včetně ostatní elektroinstalace a uložte k opětovné montáži.

5) Demontáž závěsů křídel (dle bulletinu Z 526/37)

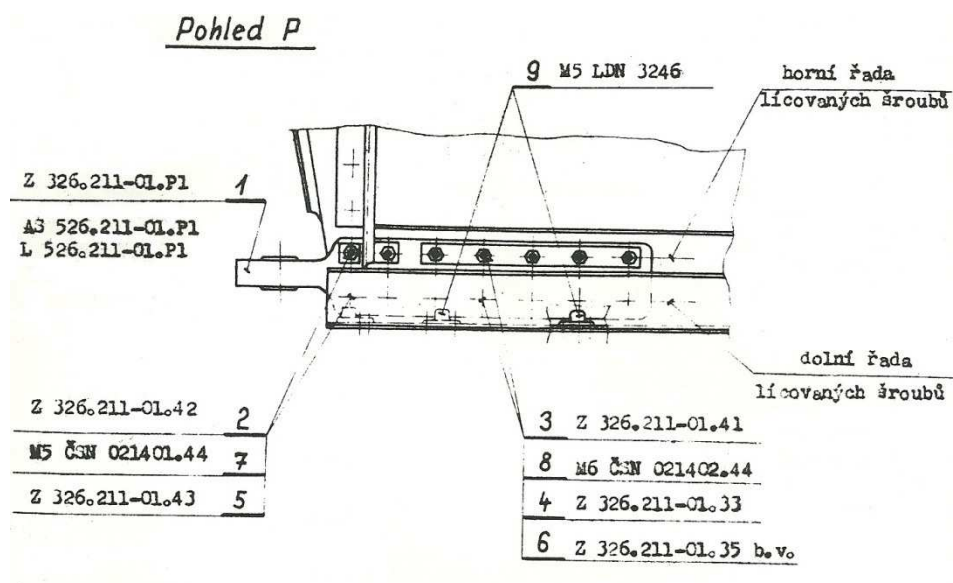


Obr. 15 - spodní část křídla Z 326 / 526 se závěsy hlavního nosníku

Dle obr. 16. Demontovat 2ks matic M5 poz. 7, 2ks podložek poz. 5 a 12ks matic M6 poz. 8, 2ks podložek poz. 4 pomocí očkového a vidlicového klíče.

Vyrazit lícované šrouby 2ks Ø5mm poz. 2, 12ks Ø6mm poz. 3 a vyjmout spojovací kování poz. 1 z křídla.

Vrtákem Ø2,7mm odvrtat nýty na 2ks nanýtovacích matic poz. 9 a vyjmout je z křídla.



Obr. 16 - pozice spojovacího materiálu horního závěsu

6) Demontujte kotvící oko

Uvolnit a vyjmout 4 šrouby kotvícího oka na spodní straně křídla. Oko zkontrolovat a uložit.

7) Odvrtajte náběžné potahy I. až III. (poslední ponechat)

Nýty odvrtávat velmi pečlivě! Pro odvrtání nýtů Ø2,6mm použijte vrták Ø2,7mm. Pozor, odvrtat pouze hlavu nýtu, dřík nýtu se závěrnou hlavou vyrazit. Obdobně postupujte u nýtů Ø3 a Ø3,5 mm. Vždy s nejvyšší opatrností tak, aby byl pokud možno zachován původní rozměr otvoru pro nýt. V případě, že dojde k poškození průměru otvoru, je nutné jej převrtat na průměr nýtu nejbližšího vyššího rozměru. Úměrně tomu upravit prosazení (zahloubení) pro hlavu nýtu. Odvrtané potahy umýt a vizuálně kontrolovat na trhliny. Potahy s trhlínami vyměnit za nové. Komponenty uložit k následné montáži.

8) Demontujte objímky pal.potrubí a odvzdušnění

Objímky umýt a očistit, vadné vyměnit za nové a uložit k montáži.

9) Odvrtajte pásnice hlavního nosníku

Pozor, při této práci postupujte s nejvyšší opatrností tak, aby bylo zabráněno poškození stojiny hlavního nosníku nedbalou prací! Pro odvrtání nýtů $\varnothing 2,6\text{mm}$ použijte vrták $\varnothing 2,7\text{ mm}$. Pozor, odvrtat pouze hlavu nýtu, dřík nýtu se závěrnou hlavou vyrazit. Obdobně postupujte u nýtů $\varnothing 3$ a $3,5\text{mm}$. Vždy s nejvyšší opatrností tak, aby byl pokud možno zachován původní rozměr otvoru pro nýt. V případě, že dojde k poškození průměru otvoru, je nutné jej převrtat na průměr nýtu nejbližšího vyššího rozměru. Úměrně tomu upravit prosazení (zhloubení) pro hlavu nýtu.

10) Zkontrolovat otvory stojiny

Po odvrtání pásnic kontrolujte otvory stojiny pro lícované šrouby hlavních závěsů. Ke kontrole použijte lupu 10x zvětšující a zaměřte se na kontrolu lícovaných otvorů na trhliny. V případě nálezu začínající trhliny je možné použít výstružník o \varnothing max. $6,2\text{mm}$ k odstranění zárodku trhliny, viz. [6]. Pokud je trhlina větší, musí být nosník nahrazen novým nebo křídlo vyřazeno. Stejně tak použijeme přestružení na $\varnothing 6,1$ nebo $6,2\text{mm}$ v případě mechanického poškození, koroze nebo jiného defektu v otvoru.

11) Přenesení otvorů pásnic na šablony

Podle odvrtaných pásnic přeneste otvory na šablony (plechové planžety) a každou z nich označte číslem křídla a pozicí v sestavě. Rovněž označit odvrtané pásnice číslem křídla a pozicí v sestavě. Jednotlivé pásnice přiložíme k technologickým planžetám na které přeneseme otvory a číselné označení pásnic.

Tohoto postupu musí být použito vzhledem k tehdejší technologii vrtání děr do pásnic.

12) Ustavte a svrtejte nové pásnice se stojinou dle šablon

Pečlivě ustavte a svrtejte nové pásnice dle technologických planžet. Při této práci postupujte s nejvyšší opatrností tak, aby nedošlo k

mechanickému poškození pásnic a nebo chybnému přenesení (navrtání) otvorů.

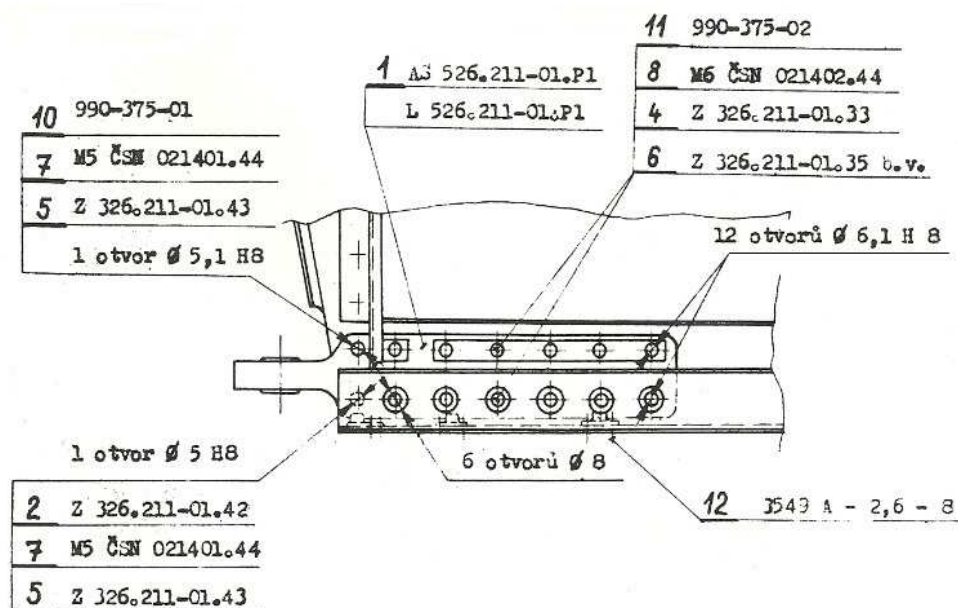
13) Případn. provést povrchovou ochranu pásnic nástřikem základní barvou

Nástřik základní barvou Synorex S2003/0600 provedeme pouze na plochách, které nelícují se stojinou hlavního nosníku.

14) Nanýtujte pásnice ke stojině

Pásnice opatřené základním nátěrem ustavíme v sestavě (na agrafy) a zkontrolujeme sesouhlasení otvorů pro nýty. Je-li to u některých otvorů nutné, pak je znovu převrtáme a po kontrole eventuálně použijeme nýt nejbližšího vyššího průměru. Hlavní závěsy namontujte na křídlo za účelem svrtání průměru otvorů v nových pásnicích (polohu závěsu zafixovat technologicky na Ø18, resp. 20mm čepem závěsu křídla, kontrolovat polohu a teprve poté svrtat pomocí vrtacích pouzder).

15) Montáž nových hlavních závěsů křídel (dle bulletinu Z 526/37)

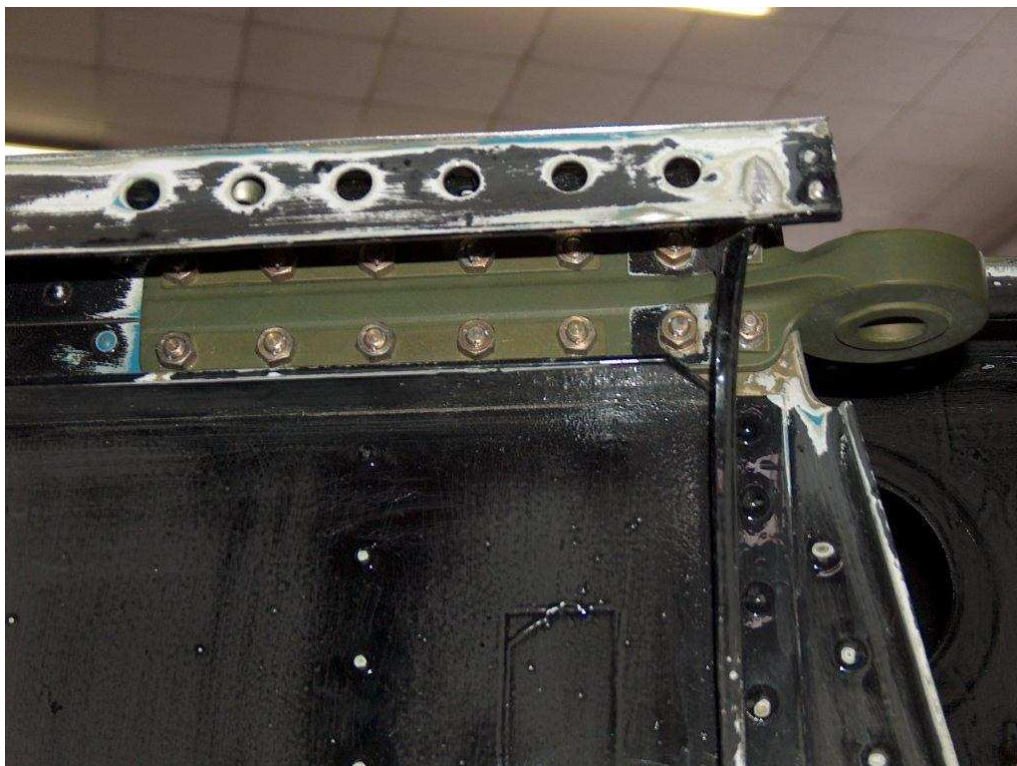


Obr. 17 - pozice spojovacího materiálu horního závěsu

Dle obr. 17. Kování přestružit na poz. 1 krajní otvor v dolní řadě z Ø4,8mm na Ø5 H8 pro nový lícovaný šroub. Kování nasunout na stojinu nosníku křídla, vymezovací vložky poz. 6 a vyrovnávací podložky poz. 4, 5 umístíme dle označení přesně tak, jak byly umístěny před demontáží. Veškerý spojovací materiál montujeme jako nový.

Lícovaný šroub Ø5mm poz. 2 a matici M3 poz. 7 po ustavení kování dotáhneme. Stružíme poslední otvor v horní řadě na Ø6,1 H8, montujeme lícovaný šroub Ø6,1mm poz. 11, matici M6 poz. 8 a dotáhneme. Dále stružíme zbývající otvory na Ø6,1 H8, jeden otvor na Ø5,1 H8. Při stružení spodní řady využíváme vyvrtaných otvorů Ø8mm ve výztuze na křídle. Montujeme lícované šrouby Ø6,1mm poz. 11, matice M6 poz. 8 a lícovaný šroub Ø5,1mm poz. 10 s maticí M5 poz. 7. Po dotažení pojistíme matice třemi důlčíky. Přinýtujeme matice poz. 9. Nezapomenout zapojit táhlo křidélek na převodovou páku.

Při případné další výměně spojovacího kování je postup práce obdobný. Použijeme však lícované šrouby Ø6,2mm č.v. 990-375-04 a Ø5,2mm č.v. 990-375-03. Otvory pak stružíme na Ø6,2 H8 a Ø5,2 H8.



Obr. 18 - detail horního závěsu

Pozn.: Spojovací kování horní č.v. AS 526.211-01.P1 se dodává s předvrtanými otvory Ø5,8mm a Ø4,8mm k přestružení pro lícované šrouby a otvorem Ø18H8 pro čep křídla. Spojovací kování horní L 526.211-01.P1 se dodává s předvrtanými otvory Ø5,8mm a Ø4,8mm k přestružení pro lícované šrouby a otvorem Ø20H7 pro čep křídla.

16) Nanýtujte zpět náběžné potahy I.až III.

Při nýtování postupujte opačným způsobem jako při demontáži potahů. Jednotlivé potahy ustavit na agrafy. Přednostně nýtujeme řady horního potahu a vzdálenějších žeber. Tímto způsobem postupujte od konce křídla směrem k jeho kořeni. Je-li to u některých otvorů nutné, pak je znovu převrtáme a po kontrole eventuálně použijeme nýt nejbližšího vyššího průměru.

17) Proveďte zpětnou montáž demontovaných částí

Zkontrolujte dutiny křídla na přítomnost cizích předmětů. Nýty, špony a drobné nečistoty vysát, závěrné hlavy nýtu opatřit základním nátěrem S2003/0600.

Objímky palivového potrubí a odvzdušnění palivového systému, hadice s ukončenou nebo min. životností vyměníme za nové.

Kotvicí oko namontujte zpět, styčnou plochu oka a potahu opatřete nátěrem S2003/0600

Zpětná montáž pitot-statického systému a el. instalace. Hadice s ukončenou nebo min. životností vyměníme za nové.

Promazat ložiska úhlových pák a táhel. Páky a táhla montovat zpět do křídel. Vadné přemostění vyměnit za nové.

Promazat ložiska závěsů křídélka. Montáž křídélka a okrajového oblouku.

Namontujte upínací pásy nádrže paliva. Nádrž ustavit dle otvorů v krytu, šroubení upínacích pásů zajistit vázacím drátem.

18) Opravte povrchovou ochranu (nátěr) křídel

Opravit drobné defekty v laku vzniklé demontáží náběžných plechů v místech přechodů. Samotné náběžné plechy vzhledem odstranění nýtů opatřit kompletně novým nátěrem.

5.2 Další možné důvody k výměně pásnic a jejich postupy

5.2.1. Výměna pásnic v důsledku koroze a nebo jiného poškození

V tomto případě doporučujeme navíc provést odstranění starého nátěru všech závěsů křídel a jejich kontrolu nedestruktivní elektromagnetickou metodou.

5.2.2. Výměna pásnic za účelem prodloužení provozní životnosti křídel

Životnost letounu v případě výměny pásnic křídla může na základě závěrů výpočtu uvedeného v odst. 3.5 a po schválení ÚCL dosáhnout 11 000 LH (dle [1] pak až 12 000 letových hodin). Pracovní postup pro zvýšení životnosti je uveden níže.

Pro navýšení počtu letových hodin musí být provedena výměna hlavních závěsů křídel za nové. Současně musí být provedena nedestruktivní elektromagnetická kontrola zadních závěsů křídel.

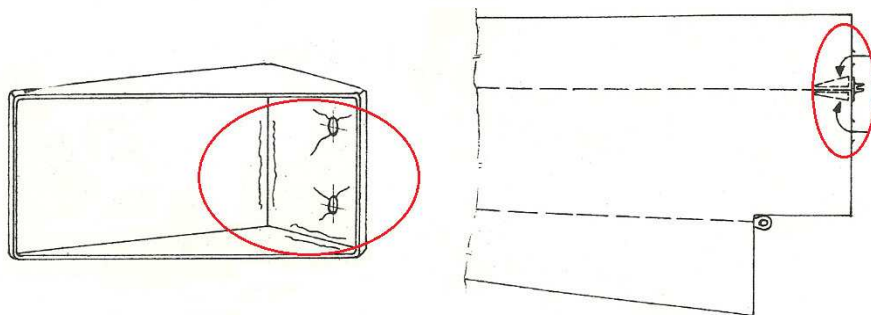
Demontáž, kontrola (eventuální výměna) a montáž výztužných krabic zadních závěsů křídel musí být provedena v souladu s bulletiny Z 526/17 a Z 526/18. Na krabicích může docházet ke tvorbě trhlin v souvislosti s překračováním povolených násobků (viz. obr. 19). Veškerý spojovací materiál při montáži musí být nový.

U letounu, kde budou zjištěny trhliny, zastavit provoz a provést opravu.

Nebudou-li v uvedených místech zjištěny trhliny, je letoun způsobilý dalšího provozu. Kontrolu výztužných krabic zadního závěsu křídla provádět při každé 50 hodinové prohlídce draku.

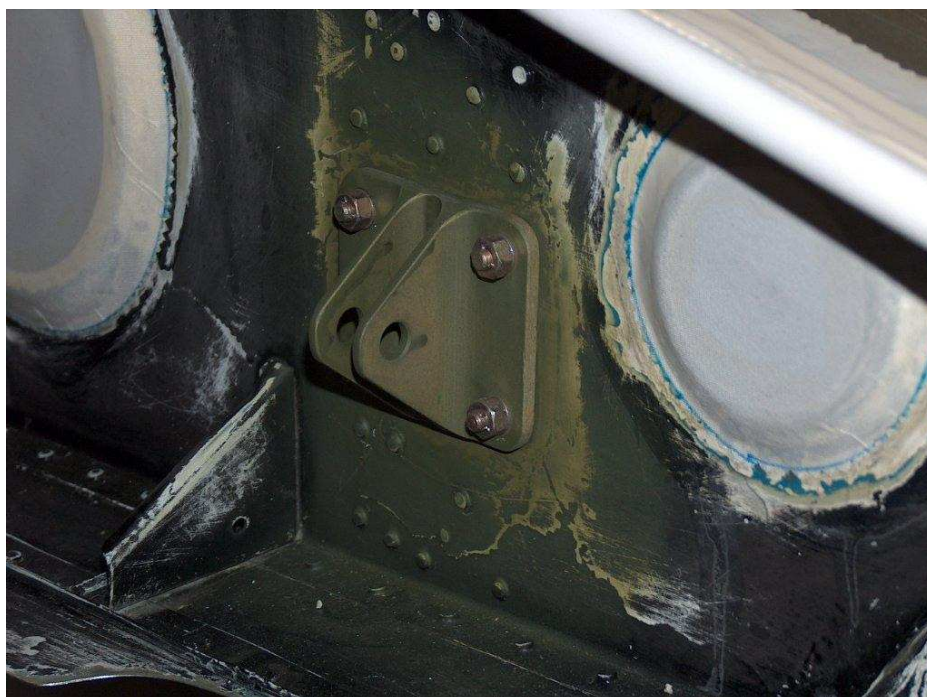
Kontrolu krabic provést vizuálně, u zpětné montáže rovněž dbát na dotažení matic a zajistit je důlčíky.

- 1) Případná výměna krabic se provádí u demontovaných křídel. Je nutné demontovat vztlakové klapky, strhnout záslepky na žebro č. 1, odvrtat spodní potah křídla vrtákem Ø2,6mm u nanýtovaných matic a vrtákem Ø3mm u ostatních nýtů (viz obr 22). Provést demontáž zadního závěsu křídla (poz. 3, obr. 21), odvrtat původní poškozené krabice (celkem 9ks ocelových nýtů ve stojně nosníku vrtákem Ø3,5mm a 4ks duralových z čel krabic vrtákem Ø3mm).



Obr. 19 - trhliny výstužné krabice a poloha v křídle

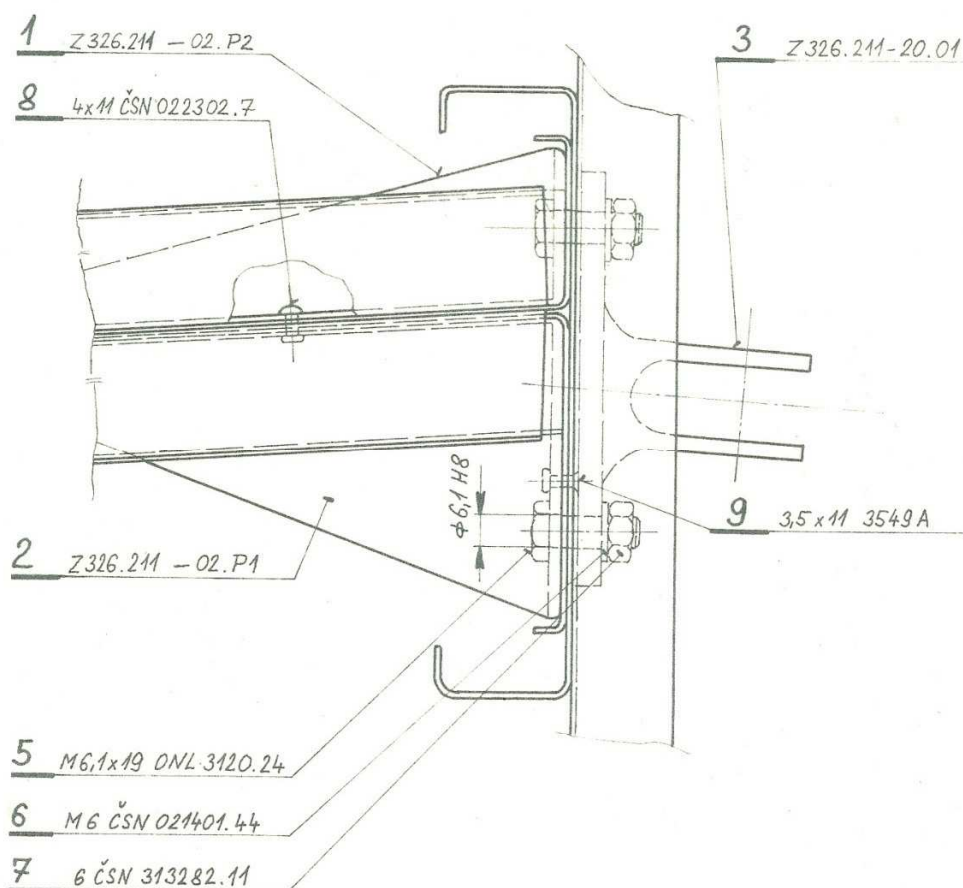
- 2) Vyčistit otvory od zbytků nýtů. Přiložit novou krabici přední č.v. Z 326.211-02.P2 (poz. 1, obr. 21) přesně do polohy jak byla ustavena krabice původní a stáhnout svěrkami ke stojině žebra a ke stojině nosníku (viz obr. 22). Ze strany od odtokové hrany přes stojinu nosníku vyvrtat 7 otvorů Ø3,5mm. Zbývajících dva otvory Ø3,5mm vrtat dle zakótování na obr. 22. Do vyvrtaných otvorů nasunout dva nýty Ø3,5mm pro zajištění polohy krabice a povolit svěrky.



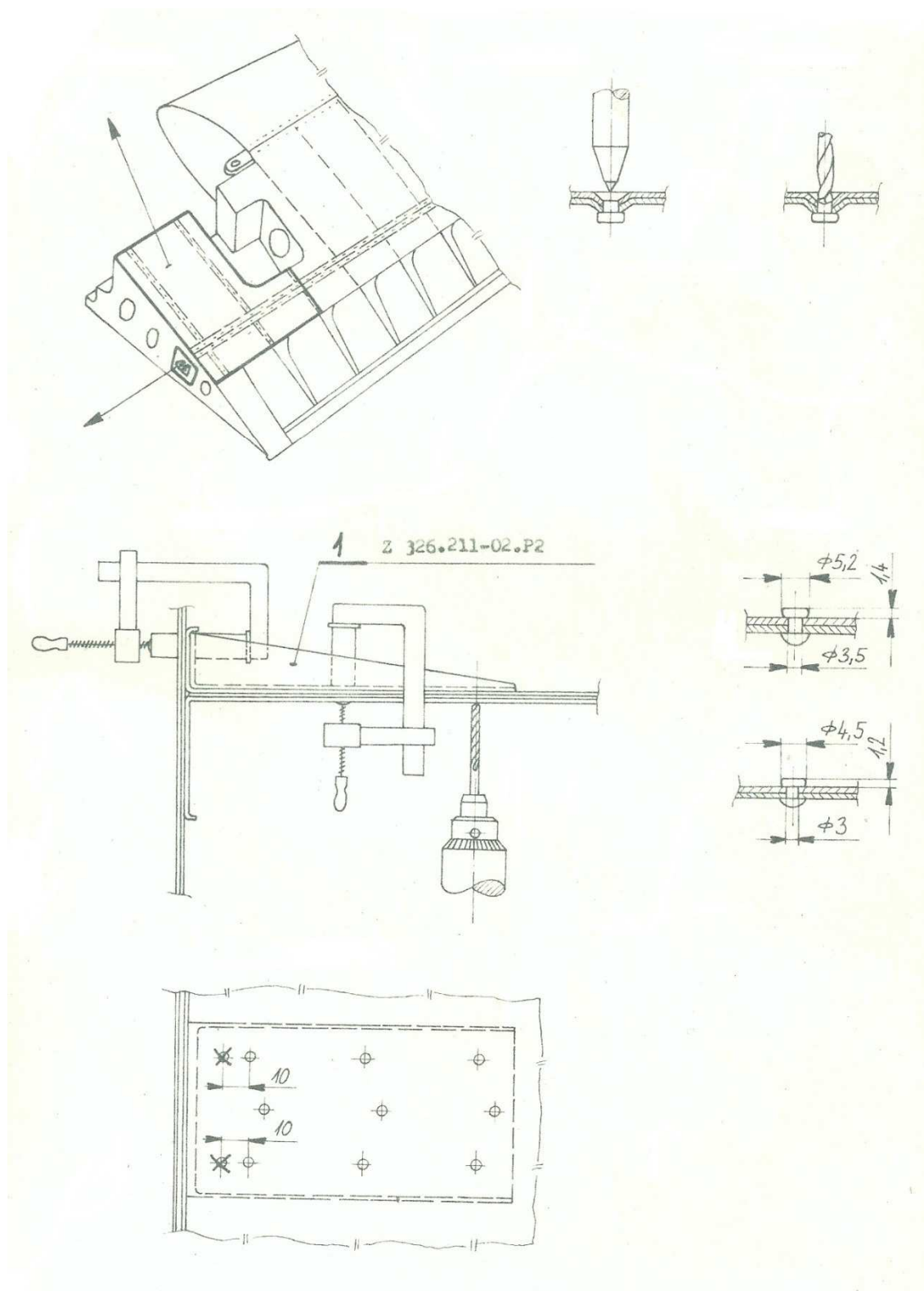
Obr. 20 - závěs zadního nosníku křídla

- 3) Přiložit zadní novou krabici č.v. Z 326.211-02.P1, ustavit do polohy jak byla ustavena krabice původní, dotáhnout obě krabice ke stojině žebra a ke stojině nosníku svěrkami, vytáhnout dva zajišťující nýty z přední krabice Ø3,5mm. Přes přední krabici směrem od náběžné hrany vrtat všech 9 otvorů Ø3,5mm, které byly vyvrtány dle odstavce výše. Tyto otvory znovu převrtat vrtákem Ø4,1mm. Přes stojinu žebra vrtat 4 otvory Ø3,5mm do čel krabic dle původních otvorů v žebře č. 1.
- 4) Po svrtání povolit svěrky, sejmut krabice, vyčistit od třísek po vrtání a ojehlit otvory.
- 5) Nasadit krabice zpět, zanýtovat 9 ocelových nýtů Ø4x11 (poz. 8, obr. 21) do stojiny nosníku. Přes stojinu žebra a čela krabic nýtovat 4ks duralových nýtů Ø3,5x11 (poz. 9, obr. 21).
- 6) Přes staré otvory v žebře označit vrtákem Ø6mm středy otvorů do čel nových krabic. Dle označení vrtat 4 otvory Ø5,8mm. Dbát aby nedošlo k otočení závěsu o 180°! Dodržet rozteče udané původními otvory v žebře č. 1. Vystružit 1 otvor v žebře Ø5,8mm na 6,1 H8 (viz obr. 21). Prostružit Ø 6,1 H8 u odpovídajícího otvoru v zadním závěsu křídla (poz. 3, obr. 21), ojehlit otvory, z vnitřní strany nasunout svorník (poz. 5, obr. 21), nasadit závěsné kování křídla (poz. 3, obr. 21), podložku (poz.7), matici (poz. 6) a lehce dotáhnout.
- 7) Ustavit závěs (poz. 3) na ostatní předvrtané otvory Ø5,8mm v žebře, stružit otvor Ø 6,1 H8 nejdříve úhlopříčně od prvního vystruženého otvoru, nastrčit svorník (poz. 5), podložku s maticí (poz. 7, 6) a mírně dotáhnout. Vystružit zbylé dva otvory, demontovat kování, provést ojehlení otvorů a vyčištění od třísek.
- 8) Nasadit všechny 4 svorníky (poz. 5), nasadit kování (poz. 3), podložky (poz. 7), matice (poz. 6), dotáhnout a zajistit 3 důlčíky.
- 9) Na odvrtaném potahovaném plechu provést prosazení, pro nýty Ø3,5mm, na kostře prosadit žebra, záhlubníkem Ø3,5mm přehloubit zahloubení.
- 10) Nasadit potahový plech, zajistit agrafy, svrtat pomocí vrtáku Ø3,6mm a postupně přinýtovat, nejdříve na pomocném nosníku a dále postupovat na obě strany od pomocného nosníku.

- 11) Po zanátytování zkontrolovat spoje, dle potřeby opravit.
- 12) Křídlo vysát od nečistot a zbytků nýtů, zalepit otvory v žebrech č. 1 plátěnými zásepky.
- 13) Opravit poškozený nátěr.
- 14) Provést montáž vztlačkových klapěk.



Obr. 21 - označení důležitých pozic při výměně výztužných krabic zadního nosníku



Obr. 22 - schéma pro výměnu výstužných krabic

6. ZÁVĚR

Cílem této diplomové práce bylo stanovit postup výměny pásnic křídla za účelem pokračování bezpečného provozu letounů ZLIN Z 126 a 226. Podmínkou, aby tento postup mohl být vůbec zpracován, byla nutnost navrhnout nový materiál, ze kterého by byly pásnice vyráběny a také ověřit životnost modifikovaného křídla pomocí výpočtu, tak aby nový materiál prokázal schopnost plnit stávající limity životnosti letounů ZLIN, či je dokonce překročil. Nový materiál v porovnání s původním vykazoval lepší pevnostní charakteristiky a dalo se tak předpokládat, že únavový výpočet překoná stávající limit životnosti, jak se také stalo. Dalším logickým krokem se tedy jeví legalizace jak samotného postupu výměny pásnic křídla, tak zajištění výroby pásnic certifikovanou organizací, což je nezbytný postup pro finální řešení pokračující provozuschopnosti těchto oblíbených letounů.

V souvislosti s letouny Z 126 a 226 také vyvstává otázka, zda-li by bylo možné se zajímat o prodloužení neméně populárních a z hlediska pilotáže mnohem zajímavějších letounů řad Z 326, 526 a 726. Pokud budeme pohlížet na tento problém z hlediska proveditelnosti modernizace křídla, pak určitě ano. Nicméně životnost by měla být určena nejlépe únavovou zkouškou modernizovaného křídla, a to jak z důvodů vyšších hmotností těchto letounů a hůře dohledatelnou historií provozu, ale také z důvodů zájmu o akrobatický provoz, bez něhož by tyto letouny ztratily podstatnou část svého kouzla.



Obr. 23 - ZLIN Z 526 M

7. LITERATURA

- [1] Augustin, P.: Studie možností prodloužení životnosti letounu ZLIN Z 226 M a Z 226 MS. Zpráva LU56-2009-OST.ST, Letecký ústav FSI VUT v Brně, 2009.
- [2] Kahánek, V., Malér, Z., Švarc, A.: Zpráva o určení životnosti letounu Z 226 M po přestavbě z letounu Z 226 B a Z 226 T. Zpráva T-002/81, Aerotechnik Uherské Hradiště – Kunovice, 1980.
- [3] Jančář, M.: Zhodnocení systému prohlídek a oprav draku pro letouny ZLIN řady 26. Bakalářská práce, FSI VUT v Brně, 2010.
- [4] Popis-obsluha-údržba ZLIN 226 MS, Aerotechnik Kunovice, 1992
- [5] Závazný bulletin Z 126, Z 226/34a-Rev. 1
- [6] Opravárenská příručka Z 126, Z 226, Moravan a.s. Otrokovice, 1994
- [7] Protokoly o provedení prohlídky letounu Technickou komisí Moravan, sbírka protokolů vybraných letounu Z 226.
- [8] Zpráva o tenzometrickém měření namáhání nosníku křídla Z 226 M. Zpráva Z-226M-0180, Aerotechnik Uherské Hradiště – Kunovice, 1980.
- [9] Advisory Circular AC23-13A, Fatigue, Fail-safe and Damage Tolerance Evaluation of Metallic Structure for Part 23 Airplanes. FAA, 2005.
- [10] Malér, Z.: Únavová zkouška dolní pásnice nosníku centroplánu letounu Z 226 T. Moravan Otrkovice, n.p., 1974.
- [11] FAA: Metallic Materials Properties Development and Standardization. Office of Aviation Research, Washington, D.C., 2003.

8. ZKRATKY A OZNAČENÍ

A	[%]	tažnost
d	[LH ⁻¹]	střední únavové poškození pro letovou fázi
D	[LH ⁻¹]	střední únavové poškození pro typický profil letu
d _A	[LH ⁻¹]	únavové poškození na typický profil letu v rámci 1 LH v kat. A
D _A	[LH ⁻¹]	výsledné únavové poškození pro kat. A
d _D	[LH ⁻¹]	únavové poškození pro letovou fázi, dvojí obsazení
D _D	[LH ⁻¹]	únavové poškození pro typický profil letu, dvojí obsazení
d _N	[LH ⁻¹]	únavové poškození na typický profil letu v rámci 1 LH v kat. N
D _N	[LH ⁻¹]	výsledné únavové poškození pro kat. N
d _S	[LH ⁻¹]	únavové poškození pro letovou fázi, sólo obsazení
D _S	[LH ⁻¹]	únavové poškození pro typický profil letu, sólo obsazení
j _B	[1]	součinitel spolehlivosti
k _D	[1]	zastoupení letů ve dvojím obsazení v provozu
k _P	[1]	zastoupení profilu letu v provozu
k _S	[1]	zastoupení letů v sólo obsazení v provozu
l	[mm]	délka trhliny v pásnici
L _B	[LH]	bezpečná životnost
L _{BA}	[LH]	bezpečná životnost v kat. A po celou dobu života
L _{BN}	[LH]	bezpečná životnost v kat. N po celou dobu života
L _{B1A}	[LH]	počet letových hodin při převedení letounu z kat. A do kat. N
L _{B2N}	[LH]	zbýv. bezp. životnost letounu v kat. N po převedení z kat. A
L _S	[LH]	střední životnost
L _{SA}	[LH]	stř. životnost při provozu letounu v kat. A po celou dobu života
L _{SN}	[LH]	stř. životnost při provozu letounu v kat. N po celou dobu života
m	[kg]	hmotnost letounu
M _o	[Nm]	ohybový moment
n	[1]	násobek zatížení
n	[1]	třídní četnost
Σn	[1]	kumulativní četnost
n _{hZVZ}	[1]	horní násobek cyklu Z-V-Z
n _{dZVZ}	[1]	dolní násobek cyklu Z-V-Z
N	[1]	počet zatěžovacích cyklů do poruchy

R_m	[MPa]	mez pevnosti materiálu
R_e	[MPa]	mez kluzu materiálu
σ	[MPa]	napětí
σ_a	[MPa]	amplituda napětí
σ_d	[MPa]	dolní napětí
σ_h	[MPa]	horní napětí
σ_m	[MPa]	střední napětí
σ_{hekv}	[MPa]	maximum napětí ekvivalentního míjivého cyklu
σ_{1g}^{LET}	[MPa]	napětí za letu s násobkem zatížení $n = 1$
σ_{1g}^{ZEM}	[MPa]	napětí při stání na zemi
W_{XT}	[mm ³]	průřezový modul
1A		sólo obsazení letounu v kat. A
2A		dvojí obsazení letounu v kat. A
1N		sólo obsazení letounu v kat. N
2N		dvojí obsazení letounu v kat. N
ČSN		Československá norma
DOA		Design Organisation Approval
EASA		European Aviation Safety Agency
LH		letová hodina
ÚCL		Úřad pro civilní letectví
Z-V-Z		cyklus země-vzduch-země